

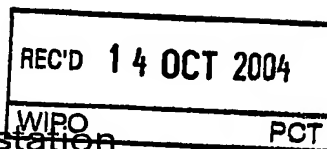


Europäisches  
Patentamt

European  
Patent Office

Office européen  
des brevets

CH 04 / 592



Bescheinigung

Certificate

Attestation

Die angehefteten Unterla-  
gen stimmen mit der  
ursprünglich eingereichten  
Fassung der auf dem näch-  
sten Blatt bezeichneten  
europäischen Patentanmel-  
dung überein.

The attached documents  
are exact copies of the  
European patent application  
described on the following  
page, as originally filed.

Les documents fixés à  
cette attestation sont  
conformes à la version  
initialement déposée de  
la demande de brevet  
européen spécifiée à la  
page suivante.

Patentanmeldung Nr. Patent application No. Demande de brevet n°

03405688.7

CH / 04 / 592

**PRIORITY  
DOCUMENT**  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

Der Präsident des Europäischen Patentamts;  
Im Auftrag

For the President of the European Patent Office

Le Président de l'Office européen des brevets  
p.o.

R C van Dijk

BEST AVAILABLE COPY



Anmeldung Nr:  
Application no.: 03405688.7  
Demande no:

Anmeldetag:  
Date of filing: 19.09.03  
Date de dépôt:

Anmelder/Applicant(s)/Demandeur(s):

Ammann Aufbereitung AG  
Eisenbahnstrasse 25  
4901 Langenthal  
SUISSE

Bezeichnung der Erfindung/Title of the invention/Titre de l'invention:  
(Falls die Bezeichnung der Erfindung nicht angegeben ist, siehe Beschreibung.  
If no title is shown please refer to the description.  
Si aucun titre n'est indiqué se referer à la description.)

Verfahren zur Ermittlung einer Bodensteifigkeit und Bodenverdichtungsvorrichtung

In Anspruch genommene Priorität(en) / Priority(ies) claimed /Priorité(s)  
revendiquée(s)  
Staat/Tag/Aktenzeichen/State/Date/File no./Pays/Date/Numéro de dépôt:

Internationale Patentklassifikation/International Patent Classification/  
Classification internationale des brevets:

E01C19/00

Am Anmeldetag benannte Vertragstaaten/Contracting states designated at date of  
filing/Etats contractants désignées lors du dépôt:

AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IT LU MC NL  
PT RO SE SI SK TR LI

5

10

## **Verfahren zur Ermittlung einer Bodensteifigkeit und Bodenverdichtungs- vorrichtung**

### **15    Technisches Gebiet**

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung eines Bodenverdichtungsgrades eines verdichteten bzw. zu verdichtenden Bodens gemäss dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1, sowie eine Bodenverdichtungsvorrichtung gemäss dem Oberbegriff des Patentanspruchs 8.

### **20    Stand der Technik**

In der deutschen Offenlegungsschrift DE-A 100 19 806 wurde versucht, ein "Springen" einer Bodenverdichtungsvorrichtung zu verhindern, da hierdurch eine Lockerung des bereits verdichteten Bodens eintreten kann, sowie eine rapide Erhöhung des Maschinenverschleisses auftritt. Hierzu wurden Schwingungen detektiert, welche Oberwellen der anregenden Schwingungen eines Bodenverdichtungselements sind. Es wurde hier  
25 davon ausgegangen, dass Oberwellen durch eine Rückwirkung einer überhöhten Schlagenergie auf einen bereits verdichteten Boden entstehen.

In der DE-A 100 28 949 wurde ein System vorgestellt, welches sich zur Bestimmung eines Verdichtungsgrades sowohl bei Walzen wie auch bei Plattenrüttlern eignete. Es  
30 wurde ein Wegsensor zur Messung einer vertikalen Bewegung des Oberbaus an diesem angeordnet. Das mit dem Sensor gemessene Signal wurde in ein erstes und in ein

- zweites Teilsignal aufgeteilt. Das erste Teilsignal durchlief ein Hochpassfilter und das zweite Teilsignal ein Bandpassfilter. Das Hochpassfilter war derart eingestellt, dass es Frequenzen knapp unter der Anregungsfrequenz passieren liess, also bei einer Anregungsfrequenz von 60 Hz konnten 51 Hz noch passieren. Das Bandpassfilter war derart  
 5 eingestellt, dass Frequenzen von 15% bis 60% der Anregungsfrequenz passieren konnten. Die vom Bandpassfilter kommenden Signale wurden durch die vom Hochpassfilter kommenden Signale dividiert. Der Quotient nahm mit der Anzahl von Passagen über einem zu verdichtenden Bereich kontinuierlich zu und sollte ein zuverlässiger Indikator für die Bodensteifigkeit sein.
- 10 In der WO 98/17865 ist eine Bodenverdichtungsvorrichtung mit einem Beschleunigungsaufnehmer an einer Bandage beschrieben. Mit der Bodenverdichtungsvorrichtung konnten gemäss Ausführungen in der WO 98/17865 die drei nachfolgenden Verdichtungsvorgänge eingestellt werden:
- Auflastbetrieb: Die Vorrichtung bleibt in Bodenkontakt. Der Beschleunigungsaufnehmer misst nur die Umlauffrequenz der Unwucht ( $1 \cdot f$ ).  
 15
  - Optimaler Betriebszustand: Die Bandage hebt periodisch vom Boden ab. Der Beschleunigungsaufnehmer misst Oberschwingungen ( $2 \cdot f$ ,  $3 \cdot f$  usw.) mit stark abnehmender maximaler Amplitude.
  - Instabiler Zustand: Die ganze Bodenverdichtungsvorrichtung (Walze) fängt an zu  
 20 springen. Es treten zu den Oberschwingungen Subharmonische ( $1/2 \cdot f$ ,  $3/2 \cdot f$ ,  $5/2 \cdot f$  usw.) auf.
- Eine Verdichtung sollte immer dann optimal sein, d. h. am schnellsten und unter geringstem Energieaufwand vollziehbar, wenn Resonanz des Bodenverdichtungssystems auftrat. Das Bodenverdichtungssystem war aus dem zu verdichtenden Boden und der auf  
 25 diesen einwirkenden Verdichtungseinrichtung gebildet.
- In der US-A 4,546,425 wird dargelegt, wie ein zu verdichtender Boden bei gleichbleibenden Maschinendaten durch mehrere Überfahrten immer härter wurde und die verdichtende Walze zu springen begann. Um dieses Springen zu verhindern, wurde ein einstellbarer Exzenter verwendet.
- 30 In der US-A 5,695,298 wurden mit einem an einer Halterung und an einer Bandage angeordneten Beschleunigungsmesser Schwingungen dieser Bandage ermittelt. Das Messsignal wurde auf ein erstes Bandpassfilter für die Anregungsfrequenz (oder höhere

Frequenzen) und auf ein zweites Bandpassfilter für eine halbe Anregungsfrequenz gegeben. Mit einer Divisionsschaltung wurde das Ausgangssignal des zweiten Bandpasses (Amplitude der halben Anregungsschwingung) durch das Ausgangssignal des ersten Bandpasses (Amplitude der Anregungsfrequenz) dividiert. Der Quotient sollte einen vorgegebenen Wert, beispielsweise 5% nicht überschreiten, damit noch ein stabiles Arbeiten unter Vermeidung instabiler Zustände möglich war.

Bei einer nur geringen Anregung oder einem weichen Boden mass der Beschleunigungsmesser eine nicht harmonische Schwingung. Wurde die Anregung gesteigert oder war ein steiferer und elastischerer Boden erreicht, trat eine Periodizität der Schwingung mit halber Frequenz auf. Dieser Zustand wurde als noch stabil betrachtet. Wurde nun die Anregung noch mehr gesteigert oder war der Boden noch steifer, trat Springen der Bandage auf. Der gemessene Quotient war hier bedeutend höher als oben erwähnt.

In der US-A 5,727,900 ist eine Kontrolleinrichtung für eine Bodenverdichtungsanordnung beschrieben. Als Messdaten wurden hierbei die Beschleunigung horizontal und vertikal der Bandage, die Position des Exzenters, die Exzentrizität des Exzenters und die Rollgeschwindigkeit der Verdichtungsanordnung gemessen. Die hier beschriebene Bodenverdichtungsanordnung arbeitete analog zur US-A 5,695,298 mit demselben Stabilitätskriterium, dass das Erscheinen einer halben Anregungsfrequenz bezogen auf die Amplitude der Anregungsfrequenz auf maximal 5% zu beschränken war.

## 20 **Darstellung der Erfindung**

### **Aufgabe**

Aufgabe der Erfindung ist es, einen Bodenbereich auf eine vorgegebene oder auf eine entsprechend einer Maschinenauslegung maximal erreichbare Bodensteifigkeit zu verdichten, den erreichten Verdichtungsgrad zu ermitteln sowie eine Bodenverdichtungsanordnung zu schaffen, mit der diese optimale Bodenverdichtung vorzunehmen ist.

### **Lösung**

Die Lösung der Aufgabe erfolgt verfahrensmässig durch die Merkmale des Patentanspruchs 1 und Vorrichtungsmässig durch die Merkmale des Patentanspruchs 7.

Um eine optimale Bodenverdichtung, d.h. eine Bodenverdichtung mit einer vorgegebenen bzw. maximal möglichen Bodensteifigkeit (Verdichtungsgrad) zu erreichen, wird

eine auf den Bodenbereich einwirkende Bodenkontakteinheit einer Bodenverdichtungs-  
 vorrichtung über diesen bewegt. Auf die Bodenkontakteinheit wirkt hierbei eine zeitlich  
 sich periodisch mit wenigstens einer Einwirkungsfrequenz ändernde Kraft ein. Die  
 Schwingungen eines Schwingungssystems, bestehend aus der Bodenverdichtungs-  
 5 vorrichtung mit der Bodenkontakteinheit und dem jeweiligen Bodenbereich, werden ermit-  
 telt. Die Schwingungsform der Schwingung des Schwingungssystems wird aufgenom-  
 men und aus der Schwingungsform, aus den Maschinenparametern der Bodenverdich-  
 tungsvorrichtung und aus der zeitlichen Lage der einen Bodenverdichtungskraft wird  
 dann die Bodensteifigkeit (Verdichtungsgrad) ermittelt.

- 10 Vorzugsweise wird hier im Gegensatz zu den bekannten Bodenverdichtungsverfahren  
 bzw. den bekannten Bodenverdichtungsrichtungen nicht versucht, Subharmonische  
 zur Einwirkungsfrequenz zu eliminieren. Im Gegenteil, sie werden bewusst ausgewertet.  
 In vorteilhafter Weise wird nämlich von der Erkenntnis ausgegangen, wie in der Detail-  
 beschreibung dargelegt ist, dass die Frequenzen der Subharmonischen einen erreichten  
 15 Bodenverdichtungsgrad definieren: Je tiefer die Frequenz der tiefsten Subharmonischen  
 ist, desto grösser ist der Bodenverdichtungsgrad, über den eine Bodenkontakteinheit  
 einer Bodenverdichtungsrichtung bewegt wird.

In einer besonderen Ausführungsvariante werden nicht nur die Subharmonischen er-  
 mittelt, sondern auch deren Amplituden, welche zur Amplitude der Einwirkungsfrequenz  
 20 ins Verhältnis gesetzt werden. Vorzugsweise wird man die maximalen Amplitudenwerte  
 hierzu verwenden. Es können aber auch Amplitudenwerte bei einer vorgegebenen Pha-  
 senlage verwendet werden. Wie aus einem unten beschriebenen Feigenbaum Szenario  
 ersichtlich ist, ergibt diese Berücksichtigung neben der Ermittlung der Subharmonischen  
 eine exaktere Bestimmung der erreichten bzw. vorhandenen Bodensteifigkeit.

- 25 Man kann nun die Bodenkontakteinheit, welche mit dem zu verdichtenden bzw. bereits  
 verdichteten Boden in Kontakt ist, mit einer einzigen Sinus-Schwingung in der Regel  
 durch einen umlaufenden Exzenter oder durch zwei winkelmässig gegeneinander ver-  
 stellbare Exzenter kraftmässig beaufschlagen. Es können aber auch mehrere Exzenter  
 mit unterschiedlichen Umlauffrequenzen verwendet werden. Zu jeder dieser Frequenzen  
 30 ergibt sich dann eine Reihe von Subharmonischen je nach erreichtem Bodenverdich-  
 tungsgrad. Werden mehrere "Grundfrequenzen" verwendet, kann eine detailliertere Aus-  
 sage über die erreichte bzw. die zu messende Bodenverdichtung gemacht werden.

- Vorzugsweise wird man jedoch die Einwirkungsfrequenz auf die Bodenkontakteinheit einstellbar wählen. Bei einer einstellbaren Frequenz kann nämlich eine Resonanz des Schwingungssystems, bestehend aus Bodenkontakteinheit und dem zu verdichtenden bzw. verdichteten Bodenbereich, ermittelt werden. Ein Arbeiten in Resonanz ergibt eine
- 5 Verdichtung bei reduzierter Verdichtungsleistung. Da das Schwingungssystem aufgrund der zu erbringenden Verdichtungsleistung ein gedämpftes System ist, ergibt sich aus dem Grad der Dämpfung ein Phasenwinkel zwischen der maximalen Amplitude der Anregung (z.B. Kraft durch die rotierenden Unwuchten) und der Schwingung des Systems = Schwingung der Bodenkontakteinheit). Um diesen Phasenwinkel bestimmen zu können,
- 10 wird man auf der Bodenkontakteinheit neben einem Sensor für die Subharmonischen einen Sensor anbringen, der die zeitliche Auslenkung in Bodenverdichtungsrichtung misst. Die zeitliche Auslenkung der Anregung (Kraftaufbringung auf die Bodenkontakteinheit) kann ebenfalls gemessen werden; man kann sie jedoch leicht aus der augenblicklichen Stellung der Unwucht bzw. der Unwuchten ermitteln. Die zeitliche Lage
- 15 der maximalen Amplituden (Anregungsschwingung zur Schwingung der Bodenkontakteinheit) wird man mit einer Vergleichereinheit ermitteln. Die Anregung wird man vorzugsweise derart einstellen, dass die maximale Amplitude der Anregung um  $90^\circ$  bis  $180^\circ$ , vorzugsweise um  $95^\circ$  bis  $130^\circ$  der maximalen Amplitude der Bodenkontakteinheit vorseilt.
- 20 Vorzugsweise wird man auch die maximale Amplitude der anregenden Kraft einstellbar auslegen. Eine Verstellung der anregenden Kraft kann bei der Verwendung z.B. von zwei Unwuchten erreicht werden, welche mit gleicher Umdrehungsgeschwindigkeit rotieren und deren winkelmässiger Abstand änderbar ist. Die Unwuchten können gleichsinnig oder auch gegensinnig bewegt werden.
- 25 Das Auftreten von Subharmonischen kann, sofern eine eine Bodenkontakteinheit aufweisende Bodenverdichtungsvorrichtung nicht entsprechend ausgelegt ist, zu Maschinenschäden führen. Man wird deshalb Dämpfungselemente zwischen der jeweiligen Bodenkontakteinheit und den restlichen Maschinenteilen derart auslegen, dass eine Übertragung der Subharmonischen gedämpft wird. Man kann natürlich die gesamte Bodenverdichtungseinheit derart auslegen, dass die tieffrequenten Subharmonischen kei-
- 30 nen Schaden anrichten; deren Frequenz ist ja gemäss den Ausführungen in der Detailbeschreibung bekannt. Man kann aber auch die Amplitude der anregenden Kraft so weit herunterfahren, dass die Amplituden der Subharmonischen keinen Schaden anrichten bzw. nicht mehr vorhanden sind.

### Kurze Beschreibung der Zeichnungen

Die zur Erläuterung der Ausführungsbeispiele verwendeten Zeichnungen zeigen

- Fig. 1 eine schematische Darstellung zur Erklärung eines analytischen Modells eines schwingungsfähigen Systems mit einem beispielsweise Walzenzug und einem zu verdichtenden bzw. verdichteten Bodenbereich,
- Fig. 2 ein Beispiel einer Umsetzung eines dimensionslosen Modells in ein Simulink-Modell,
- Fig. 3 einen Vergleich zwischen einer gemessenen (links) und einer berechneten (rechts) Bewegung einer springenden Bandage auf einem harten Bodenbereich, wobei auf der Abszisse die Zeit und in der Ordinate die jeweilige Auslenkung aufgetragen sind,
- Fig. 4 ein vereinfachtes Modell einer schwingenden Bodenkontakteinheit auf einem zu verdichtenden bzw. verdichteten Bodenbereich,
- Fig. 5 einen gemessenen (rechts) und einen berechneten (links) Phasenraum (Orbital) einer Bodenverdichtungseinheit (Bandage des Walzenzuges AC 110 Ammann), wobei die Abszisse die Auslenkung in x-Richtung und die Ordinate die Geschwindigkeit in X-Richtung zeigt (ein einzelner Kurvenzug schliesst sich immer nach der Zeit einer Grundschwingung = Anregungsfrequenz der Bandage),
- Fig. 6 ein Bewegungsverhalten eines Walzenzuges bei gleichbleibenden Maschinenparametern über einem unterschiedlich harten Untergrund,
- Fig. 7 ein Beispiel einer chaotischen Bewegung einer Grabenwalze auf hartem Untergrund (Bodenbereich), wobei die obere Abbildung eine Auslenkung des Oberwagens (gestrichelt) und eines Unterwagens (ausgezogen) der Grabenwalze über der Zeit darstellt, die mittleren beiden Abbildungen das zur Auslenkung gehörende Frequenzspektrum und die unteren drei Abbildungen links einen Phasenraum für den Oberwagen, die mittlere Abbildung die verwendete Grabenwalze und die rechte Abbildung einen Phasenraum für den Unterwagen zeigen;



Fig. 8 eine zu **Figur 7** analoge Darstellung jedoch für eine Vibrationsplatte,

Fig. 9 eine Zusammenstellung dynamischer Verdichtungsgeräte im Verzweigungsdiagramm, wobei  $n = 1$  eine Anregung mit einer Grundschiwingung,  $n = 2$  eine erste Subharmonische ( $f/2$ ),  $n = 4$  die nächste Subharmonische ( $f/4$ ),  $n = 8$  eine dritte Subharmonische ( $f/8$ ) kennzeichnet,

Fig. 10 eine einfache Ausführung zur Abschätzung einer Bodenverdichtung, wie man sie vorzugsweise an einer Vibrationsplatte anordnen kann und

Fig. 11 eine Variante zu der in **Figur 10** dargestellten Schaltung.

Grundsätzlich sind in den Figuren gleiche Teile und Elemente mit gleichen Bezugszeichen versehen.

### Wege zur Ausführung der Erfindung

Bei einer analytischen Beschreibung dynamischer Bodenverdichtungsrichtungen nimmt eine Betrachtung einer Bodenkontakteinheit zusammen mit dem verdichteten bzw. zu verdichtenden Boden als ein einziges System eine zentrale Rolle ein. In **Figur 1** ist hierzu ein Walzenzug **1** mit hinteren, gummibereiften Rädern **3** und einer vorderen Bandage **5** als Bodenkontakteinheit sowie einem Chassis **6** dargestellt. Ausgehend von diesem System ist eine einseitige Bindung zwischen einem zu verdichtenden Bodenbereich **7** (Unterbau) und dem Walzenzug **1** (Verdichtungsgerät) der Hauptgrund für das Auftreten nichtlinearer Effekte. Die einseitige Bindung wird begründet durch die Tatsache, dass zwischen dem Verdichtungsgerät **1** und dem Bodenbereich **7** Druckkräfte aber keine Zugkräfte übertragen werden können. Dementsprechend handelt es sich um eine kraftgesteuerte Nichtlinearität; das Verdichtungsgerät **1** verliert bei Überschreiten maximaler Bodenkraftwerte periodisch den Kontakt zum Bodenbereich **7** (Untergrund). Zusätzliche nichtlineare Elemente der Bodeneigenschaften, wie beispielsweise schubdehnungsgesteuerte Steifigkeitsveränderungen, können im Vergleich dazu vernachlässigt werden. Auch die überlineare Federkennlinie von (Gummi-) Dämpfungselementen **8** zwischen Chassis **6** und Bodenkontakteinheit **5** (Bandage), bzw. einem Oberwagen **9** und einem Unterwagen **11** einer später erläuterten Grabenwalze **12** ist von untergeordneter Bedeutung und beeinflusst die Rechenergebnisse einer analytischen Beschreibung nicht wesentlich. Analoges gilt für eine Vibrationsplatte **14** mit einem Oberwagen **15** und einem Unterwagen **17**.

5  
10

15  
20

25

(1)

$$F_B = c_B \dot{x}_d + k_B x \quad \text{für } F_B > 0$$

$$F_B = 0 \quad \text{sonst}$$

30\_

$m_u r_u$  : stat. Moment Unwucht [kg m]

$x_d$  : Bewegung schwingende Masse [mm]

$x_f$  : Bewegung Auflastgewicht [mm]

$\Omega$  : Erregerkreisfrequenz [ $s^{-1}$ ]  $\Omega = 2\pi \cdot f$

5  $f$  : Erregerfrequenz [Hz]

$k_B$  : Steifigkeit der Unterlage/des Bodenbereichs [MN/m];

$c_B$  : Dämpfung der Unterlage/des Bodenbereichs [MN/m]

$k_G$  : Steifigkeit der Dämpfungselemente [MN/m]

$c_G$  : Dämpfung der Dämpfungselemente [MN/m]

10 Eine Bodenreaktionskraft  $F_B$  zwischen Bandage 5 und verdichtetem bzw. zu verdichtendem Bodenbereich 7 steuert dabei die Nichtlinearität der einseitigen Bindung.

Die analytische Lösung der Differentialgleichungen (1) besitzt die folgende, allgemeine Form:

$$x_d = \sum_j A_j \cos(j \cdot \Omega \cdot t + \varphi_j) \quad (2)$$

15  $j = 1$  lineare Schwingungsantwort, Auflastbetrieb

$j = 1, 2, 3, \dots$  periodisches Abheben (die Maschine verliert pro Erregungsperiode einmal den Kontakt zum Boden)

$j = 1, 1/2, 1/4, 1/8, \dots$  und zugehörige Oberwellen: Springen, Taumeln, chaotischer Betriebszustand

20 Für Grabenwalzen (**Figur 7**), Vibrationsplatten (**Figur 8**) und Stampfer gelten grundsätzlich dieselben Überlegungen, unter Berücksichtigung des jeweiligen Erregerprinzips resultieren analoge Gleichungen.

Eine numerische Simulation erlaubt die Berechnung der Lösungen der Gleichungen (1). Insbesondere für den Nachweis chaotischer Schwingungen ist die Verwendung numeri-

25 scher Lösungsalgorithmen unerlässlich. Mit Hilfe analytischer Berechnungsverfahren, wie der Mittelungsmethode, können für lineare und nichtlineare Schwingungen sehr gute Näherungslösungen und Aussagen grundsätzlicher Natur zu einer Bifurkation der Grundschrwingungen getroffen werden. Die Mittelungstheorie ist beschrieben in Andereggs Roland (1998), "Nichtlineare Schwingungen bei dynamischen Bodenverdichtern,"  
30 Fortschritte VDI, Reihe 4, VDI Verlag Düsseldorf. Dies erlaubt einen guten Gesamtüber-

blick über die auftretenden Lösungen. Bei mehrfach verzweigenden Systemen sind analytische Methoden mit einem unverhältnismässig hohen Aufwand verbunden.

- Als Simulationswerkzeug wird das Programmpaket Mathlab/Simulink® verwendet. Des-  
 5 seinen graphische Benutzeroberfläche und die zur Verfügung stehenden Tools sind sehr  
 geeignet zur Behandlung des vorliegenden Problems. Die Gleichungen (1) werden zu-  
 erst in eine dimensionslose Form transformiert, um eine höchstmögliche Allgemeingül-  
 tigkeit der Resultate zu erreichen.

Zeit:  $\tau = \omega_0 t$ ;  $\omega_0 = \sqrt{k_B / m_d}$

Resonanzverhältnis:  $\kappa = \frac{\Omega}{\omega_0}$  mit  $\Omega = 2\pi \cdot f$

- 10 d.h.  $\kappa = f/f_0$ , wobei  $f$  die Anregungs- und  $f_0$  die Resonanzfrequenz [Hz] ist.  
 $\omega_0$  ist die Kreis-Resonanzfrequenz des Schwingungssystems "Maschine-Boden" [s<sup>-1</sup>].

Ort:  $\eta = \frac{x_d}{A_0}$ ;  $\varsigma = \frac{x_f}{A_0}$ ;  $\eta'' = \omega_0^2 \eta$ ;  $\varsigma'' = \omega_0^2 \varsigma$ ; Amplitude  $A_0$   $f$  ist frei wählbar

Materialkenngrössen:  $\delta = \frac{c_B}{\sqrt{m_d k_B}} = 2d_B$ ;  $\lambda_c = \frac{c_G}{c_B}$ ;  $\lambda_k = \frac{k_G}{k_B}$ ;

Massen und Kräfte:  $\lambda_m = \frac{m_f}{m_d}$ ;  $A_{th} = \frac{m_u r_u}{m_d}$ ;  $\gamma = \frac{A_{th}}{A_0}$ ;  $f_B = \frac{F_B}{k_B \cdot A_0} = k_B A_0 (\eta + \delta \eta')$ ;

15  $\eta = \frac{x_d}{A_0}$ ;  $\eta_0 = \frac{m_d \cdot g}{k_B A_0}$ ;  $\varsigma_0 = \frac{m_f \cdot g}{k_B A_0}$ ;

$\eta'' + f_B + \lambda_c \delta (\eta' - \varsigma') + \lambda_k (\eta - \varsigma) = \gamma \kappa^2 \cos(\kappa \tau) + \eta_0$   
 $\lambda_m \varsigma'' + \lambda_c \delta (\varsigma' - \eta') + \lambda_k (\varsigma - \eta) = \varsigma_0$  wobei gilt:  $f_B = \begin{cases} \delta \eta' + \eta & \text{falls } f_B > 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$  (3)

Die resultierenden Gleichungen (3) werden graphisch mit Simulink® modelliert, siehe **Figur 2**. Die Nichtlinearität wird vereinfacht als eine rein kraftgesteuerte Funktion betrachtet und mit Hilfe des „Switch“-Blocks aus der Simulink-Bibliothek modelliert.

- 20 Das Koordinatensystem der Gleichungen (1) und (3) beinhaltet eine statische Einsen-  
 kung infolge des Eigengewichts (statisches Auflastgewicht  $m_f$ , schwingende Masse  $m_d$ ).  
 Im Vergleich mit Messungen, die aus der Aufintegration von Beschleunigungssignalen  
 resultieren, muss die statische Einsenkung zu Vergleichszwecken im Simulationsresul-  
 tat subtrahiert werden. Die Anfangsbedingungen für die Simulation sind alle "0" gesetzt.  
 25 Die Resultate werden für den Fall des eingeschwungenen Zustands angegeben. Als Lö-

ungssolver wird „ode 45“ (Dormand-Price) mit einer variablen Integrationsschrittweite (max. Schrittweite 0.1 s) im Zeitbereich von 0 s bis 270 s gewählt.

In **Figur 3** ist ein Vergleich zwischen einem simulierten und einem gemessenen Fall eines „starken Springens“ eines Walzenzuges **1**, hier eines Walzenzuges der Firma Ammann AC 110 mit 11 t Gesamtgewicht, dargestellt. Eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenem und berechnetem Schwingungsverhalten einer Bandage **5** ist erkennbar. Neben einem Amplitudenverhältnis der Grundschiwingung ( $j = 1$ ) zu einer Subharmonischen ( $j = 1/2$ ) ist ein identischer Phasenwinkel bei einer Messung und bei der Berechnung zu erkennen (gleiche Schwingungsform). Die Messdaten wurden mit einem in vertikaler Richtung am nichtdrehenden, schwingenden Teil der Bandage **5** montierten Beschleunigungssensor erfasst, das Signal anschliessend verstärkt und mit Hilfe eines Programmpakets z.B. LabView/DIAdem® analysiert.

Aus diesem Vergleichsbeispiel ergibt sich, dass mit dem oben angeführten, vergleichsweise einfachen Modell gemäss **Figur 2** bzw. den Gleichungen (1) und (2) das Betriebsverhalten eines dynamischen Bodenverdichtungsgerätes sehr treffend auch für den Fall stark nichtlinearer Effekte, wie dem „Springen“, beschrieben werden kann und das Berechnungsmodell somit alle relevanten Parameter berücksichtigt.

Zur Ermittlung der in **Figur 3**, rechte Abbildung, dargestellten Schwingungsform sind in dem in **Figur 2** dargestellten Simulations-Modell u.a. als Parameter eine Amplitude  $A_0$  von 1 mm und eine Bodensteifigkeit  $k_B$  von 140 MN/m vorgegeben worden. Misst man die Bewegung in einem Zeitbereich für das „Springen“ eines Walzenzuges, so kann durch ein iteratives Berechnungsverfahren auch die tatsächliche Bodensteifigkeit bis auf eine Toleranz bestimmt werden. Es müssen hierzu die Maschinenparameter des Verdichtungsgeräts, der Betriebszustand und die zeitliche Position der Unwucht bzw. der Unwuchten bekannt sein.

Der praktisch gemessene und numerisch simulierte Betriebszustand des Springens des Walzenzuges AC 110 stellt im Hinblick auf die Chaostheorie ein nichtlineares System nach Auftreten der ersten Periodenverdoppelung dar. Die Verdichtungsgeräte gehören damit zu den technischen Systemen, die grundsätzlich zu chaotischem Verhalten fähig sind. Ihre Dynamik kann folglich mit den Methoden der nichtlinearen und chaotischen Schwingungslehre beschrieben werden. Damit eröffnet sich ein grosses Feld verschiedener Analysemethoden, welche in Theorie und Praxis der Verdichtungstechnik angewendet werden können.

In der Chaostheorie haben sich verschiedene Betrachtungsmethoden nichtlinearer Schwingungen etabliert, mit deren Hilfe die Struktur des deterministischen, chaotischen Bewegungsverhaltens untersucht und nachgewiesen wird. Es wird hierzu auf die Veröffentlichungen von Moon, Francis C. (1992); "Chaotic and Fractal Dynamics, An Introduction for Applied Scientists and Engineers"; Mc Graw Hill sowie Thompson, J.M.T.; Stewart, H.B., (2002) "Nonlinear Dynamics and Chaos, 2. Edition, John Wiley & Sons, Ltd. hingewiesen.

Es handelt sich insbesondere um die Analyse von:

- Zeitreihen, d. h. Bewegungsverhalten in Funktion der Zeit;
- 10 - Spektralanalysen der Zeitreihe (Fast Fourier Transformation FFT), beispielsweise zur Erkennung subharmonischer Schwingungsanteile, chaotische Systeme besitzen kontinuierliche Spektren;
- Phasenraumanalysen, Betrachten der Weg-Geschwindigkeits-Entwicklung in Funktion des Parameters Zeit,  $x(t)$ - $\dot{x}(t)$ ;
- 15 - Zeichnet man im Phasenraum nur jene Punkte auf, für welche  $t = nT$  ( $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ) ist, erhält man die Poincaré-Abbildung; chaotische Systeme zeigen in diesen Abbildungen ihre fraktale Struktur besonders ausgeprägt;
- Berechnung des Ljapunov-Exponenten; für Werte des Exponenten grösser, bzw. gleich "0" verhält sich das System instabil. Im Bereich chaotischer Bewegungen und der jeweiligen Bifurkationspunkte tritt dieser Fall auf, es existieren mehrere Attraktoren gleichzeitig, man befindet sich im Grenzgebiet (Separatrix) zweier oder mehrerer Lösungs-Einzugsbereiche.
- 20

Für die Betrachtung des chaotischen Maschinenverhaltens von Bodenverdichtungsgeräten genügt es meist, den schwingenden Teil zu untersuchen. Insbesondere bei gut abgestimmten Gummidämpferelementen sind in den Elementen (Bandage, Chassis, ...) die dynamischen Kräfte gegenüber den statischen Kräften vernachlässigbar klein und es gilt  $\ddot{x}_d \ll \ddot{x}_d$ . In diesem Fall können die beiden Gleichungen in (1), bzw. (3) addiert werden und es ergibt sich eine Gleichung (4a) für einen Freiheitsgrad des schwingenden Elements  $x_d \equiv x$ . Das zugehörige analytische Modell findet sich in **Figur 4**.

$$30 \quad F_B = -m_d \ddot{x} + m_{II} r_{II} \Omega^2 \cos(\Omega \cdot t) + (m_f + m_d) \cdot g \quad (4a)$$

$F_B$  ist die auf den Bodenbereich wirkende Kraft; siehe **Figur 2**. Diese gewöhnliche Differentialgleichung 2. Ordnung wird in die beiden nachfolgenden Differentialgleichungen 1. Ordnung umgeschrieben:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{F_B}{m_d} + A_0 \Omega^2 \cos(\Omega \cdot t) + \left(1 + \frac{m_d}{m_f}\right) \cdot g \end{cases} \quad (4b)$$

- 5 mit  $A_0 = \frac{m_u r_u}{m_d}$  und  $F_B = c_B \dot{x}_d + k_B x$  für  $F_B > 0$  als bodenkraftgesteuerte Nichtlinearität.  
 $F_B = 0$  sonst

Es gilt die Identität  $x_2 \equiv \dot{x}$ .

Daraus wird eine Phasenraum-Darstellung mit  $x_1(t) - x_2(t)$ , bzw.  $x(t) - \dot{x}(t)$  abgeleitet.

- Die Phasenkurven, auch als Orbitale bezeichnet, sind im Fall linearer, stationärer und monofrequenter Schwingungen geschlossene Kreise bzw. Ellipsen. Bei nichtlinearen  
 10 Schwingungen, bei denen zusätzlich Oberwellen auftreten (periodisches Abheben der Bandage vom Boden), sind die Oberwellen als aufmodulierte Periodizitäten zu erkennen. Erst bei Periodenverdoppelungen, also subharmonischen Schwingungen wie dem „Springen“, mutiert der ursprüngliche Kreis zu geschlossenen Kurvenzügen, die Schnittpunkte in der Phasenraum-Darstellung aufweisen.

- 15 Bezogen auf die Auswertung von **Figur 3** für den dortigen Walzenzug (Ammann AC 110) auf harter Unterlage ergibt sich die in **Figur 5** dargestellte Phasenkurve. Die linke Darstellung zeigt die gemessenen und die rechte Darstellung die berechneten Werte. Wiederum zeigt sich die Übereinstimmung der Simulation mit den in der Praxis gemessenen Daten.
- 20 Mit zunehmender Zahl der Subharmonischen treten immer mehr Schnittpunkte auf, vergl. die Phasenkurven in **Figur 7** für eine Grabenwalze und für eine Vibrationsplatte in **Figur 8**.

- Es hat sich gezeigt, dass das Auftreten von subharmonischen Schwingungen in Form von Verzweigungen oder Bifurkationen ein weiteres, zentrales Element stark nichtlinearer und chaotischer Schwingungen ist. Im Gegensatz zu Oberwellen stellen subharmonische Schwingungen einen neuen, gesondert zu behandelnden Betriebszustand eines  
 25 nichtlinearen Systems dar; dieser Betriebszustand unterscheidet sich stark vom ursprünglichen, linearen Problem. Oberwellen sind nämlich klein im Verhältnis zur Grundschwingung, d. h. die nichtlineare Lösung des Problems verbleibt, mathematisch be-

trachtet, in der Umgebung der Lösung des linearen Systems.

Die zugehörigen Amplituden der zusätzlichen subharmonischen Schwingungsanteile befinden sich hingegen in derselben Grössenordnung wie die Grundschiwingung. Die **Figur 6** zeigt das gemessene, unvermittelte Auftreten des Springens eines Walzenzugs (Ammann AC 110) beim Übergang der Maschine von einer sehr weichen Unterlage (Reifen) auf ein bereits verdichtetes, hartes Sand-Kies-Gemisch. Bei ansonsten gleichbleibenden Maschinenparametern sind Bodensteifigkeit und Dämpfung die veränderlichen Systemparameter. In **Figur 6** oben ist das gemessene Schwingungsverhalten dargestellt, welches sofort auf den Systemparameterwechsel reagiert und ohne zusätzliche Energiezufuhr zu „springen“ beginnt, d. h. die erste Subharmonische mit der Frequenz  $f/2$ , bzw. der Periodizität  $2T$  tritt sofort auf (Zeitdauer des Wechsels: ca. 4 Umdrehungen der Unwucht bei 36 [Hz] Vibrationsfrequenz  $\Rightarrow$  ca.  $1/9$  [s] Übergangszeit,  $m_d = 4000$  [kg]). Man beachte, dass sich die Bandage auf dem weichen Pneu ( $k_B = 30$  MN/m) im linearen Auflastbetrieb befindet, währenddem auf der harten Unterlage ( $k_B = 140$  MN/m) sofort ein Abheben, bzw. ein Springen einsetzt.

Die durchgeführte FFT zeigt in **Figur 6** links das lineare, monofrequente Schwingungsverhalten auf dem Reifen; die auf harter Unterlage zusätzlich auftretende subharmonische Schwingung weist im Vergleich zur Grundschiwingung eine rund doppelt so grosse Amplitude auf (rechte Darstellung in **Figur 6**). Misst man bei jeder Unwuchtumdrehung in einer ausgezeichneten Position des rotierenden Exzenters die zugehörige Schwingungsamplitude, bzw. den Deformationswert der Bewegung, ist dieser auf dem Pneu immer konstant (harmonisch), auf der harten Unterlage alterniert der Wert jedoch entsprechend des zusätzlichen subharmonischen Schwingungsanteils. Oberwellen sind infolge ihrer Periodizität bei dieser Art der Signalerfassung nicht zu erkennen. Die Messwerterfassung kann in der Praxis durch den Impuls einer Hall-Sonde, welche den Null-Durchgang der Vibrowelle erfasst, ausgelöst werden. Damit lassen sich auch Poincaré-Abbildungen generieren. Werden die periodisch erfassten Amplitudenwerte in Funktion des variierten Systemparameters, in unserem Falle also der Bodensteifigkeit  $k_B$ , aufgetragen, entsteht das Bifurkations- oder sogenannte Feigenbaum-Diagramm (untere mittlere Darstellung in **Figur 6**). In diesem Diagramm erkennt man zum einen die Eigenschaft der sich bei steigender Steifigkeit im Bereich der Verzweigung schlagartig vergrössernden Amplituden, die Tangente an die zugehörige(n) Kurve(n) verläuft im Verzweigungspunkt vertikal. Deshalb ist in der Praxis auch keine zusätzliche Energiezufuhr für das Springen der Walze erforderlich. Das Diagramm zeigt weiter auf, dass bei steig-



- gender Steifigkeit (Verdichtung) weitere Verzweigungen folgen, und zwar in immer kürzeren Abständen bezogen auf die kontinuierlich zunehmende Steifigkeit  $k_B$ . Die Verzweigungen erzeugen eine Kaskade neuer Schwingungsanteile mit der jeweils halben Frequenz der vorhergehend tiefsten Frequenz des Spektrums. Da sich die erste Verzweigung aus der Grundschiwingung mit der Frequenz  $f$ , bzw. Periode  $T$ , abspaltet, entsteht die Frequenz-Kaskade  $f$ ,  $f/2$ ,  $f/4$ ,  $f/8$  etc. Analog zur Grundschiwingung generieren auch die Subharmonischen Oberwellen und es entsteht ein Frequenzkontinuum im tief-frequenten Bereich des Signalspektrums. Dies ist ebenfalls eine spezifische Eigenschaft des chaotischen Systems, im vorliegenden Fall also des vibrierenden Walzenzugs.
- 10 Man beachte, dass sich das System des Verdichtungsgerätes in einem deterministischen und nicht in einem stochastischen chaotischen Zustand befindet. Da die Parameter, welche den chaotischen Zustand bewirken, nicht alle messbar sind (nicht vollständig beobachtbar), kann der Betriebszustand der subharmonischen Schwingungen nicht für die praktische Verdichtung prädiktirt werden. Das Betriebsverhalten in der
- 15 Praxis ist zudem durch viele Unwägbarkeiten gekennzeichnet, die Maschine kann durch den starken Kontaktverlust zum Boden wegrutschen, die Belastung der Maschine durch die tieffrequenten Schwingungen wird sehr hoch. Laufend können weitere Bifurkationen des Maschinenverhaltens (unverhofft) auftreten, die sofort starke Zusatzbelastungen zur Folge haben. Hohe Beanspruchungen treten auch zwischen Bandage und Boden auf;
- 20 dies führt zur unerwünschten Auflockerung oberflächennaher Schichten und zieht Kornzertrümmerungen nach sich.
- So wird bei neuen Geräten, die über eine aktive Regelung der Maschinenparameter in Funktion gemessener Grössen verfügen (z.B. ACE: Ammann Compaction Expert) bei Auftreten der ersten subharmonischen Schwingung mit der Frequenz  $f/2$  sofort die Unwucht und damit die Energiezufuhr verringert. Diese Massnahme verhindert zuverlässig das unerwünschte Springen oder Taumeln der Bandage. Zudem garantiert eine kraftgesteuerte Regelung von Amplitude und Frequenz des Verdichtungsgerätes eine Steuerung der Nichtlinearität und damit eine sichere Verhinderung des Springens/Taumelns, die ja letztlich die Folge der auftretenden Nichtlinearität ist.
- 25
- 30 Aufgrund der Tatsache, dass die subharmonischen Schwingungen einen jeweils neuen Bewegungszustand der Maschine darstellen, müssen Relativmessungen, z. B. zur Erfassung des Verdichtungszustandes des Bodens, für jede neu auftretende subharmonische Schwingung neu auf die Bezugsprüfverfahren, wie beispielsweise den Druckplat-

tenversuch (DIN 18 196) geeicht werden. Im Fall eines „Kompaktometers“, bei dem zur Verdichtungskontrolle das Verhältnis von erster Oberwelle  $2f$  zu Grundschiwingung  $f$  verwendet wird, ändert sich mit dem Auftreten des Springens die Korrelation grundsätzlich; nur innerhalb des jeweiligen Verzweigungszustandes der Bewegung existiert ein linearer Zusammenhang des Messwerts mit der Bodensteifigkeit.

Für die betrachteten Maschinen tritt die Bifurkation in Form des Periodenverdoppelungsszenarios auf, die **Figur 7** bzw. die **Figur 8** zeigen dies anhand des FFT-Spektrums für eine Grabenwalze bzw. eine Vibrationsplatte.

Dieses Szenario ist grundsätzlich für alle technischen und physikalischen Systeme mit einer einseitigen Bindung gültig. Falls eine Unterlagssteifigkeit  $k_B$  sehr, bez. "unendlich" hoch wird, spricht man von auftretenden Impacts oder Stößen.

Der Phasenraum der Bewegungen des Ober- und Unterwagens der Vibroplatte und der Grabenwalze ( $\dot{x}_d - x_d$  und  $\dot{x}_f - x_f$ ) zeigen im Vergleich zum entsprechenden Orbital des Walzenzugs (**Figur 5**) deutlich die Zunahme der Komplexität der Bewegungen beim Auftreten des fortgeschrittenen Periodenverdoppelungsszenarios, bzw. des deterministischen Chaos.

Bei konstant belassenen Maschinenparametern kann das kaskadenartige Auftreten der Bifurkationen und Oberwellen mit ihren zugehörigen Periodenverdoppelungen analog den Grosswalzen als Indikator für die zunehmende Bodensteifigkeit und Verdichtung dienen (relative Verdichtungskontrolle).

Währenddem Walzen, vom Walzenzug bis zur handgeführten Grabenwalze, die Abrollbewegung der Bandagen für ihre Fortbewegung nutzen und damit kein direkter Zusammenhang zwischen Vibration und Vorwärtsbewegung besteht, ist die Vibrationsplatte für ihre Fortbewegung immer auf das periodische Abheben vom Boden angewiesen, gesteuert durch die Neigung ihres Richtschwingers. Deshalb sind die Vibrationen und die Fortbewegung miteinander direkt gekoppelt, Platten und Stampfer weisen in der Folge immer ein nichtlineares Schwingungsverhalten auf. Dadurch geraten die Geräte mit zunehmender Steifigkeit  $k_B$  schneller in den Bereich des Periodenverdoppelungsszenarios, chaotische Betriebszustände treten bei ihnen häufiger auf als bei Walzen. In der **Figur 8** ist ein gemessenes, chaotisches Frequenzspektrum dargestellt; der tiefste, ausgeprägte Schwingungsanteil mit einer Frequenz  $f_E/8$  belegt die dritte aufgetretene Bifurkation des Systems, die Oberwellen, insbesondere bei  $3x f_E/8$  (zweite Oberwelle der

Subharmonischen  $f_E/8$ ; auch die anderen Subharmonischen können Oberwellen bilden) sind stark ausgeprägt.

Da es sich bei Platten und Stampfern um Geräte mit einem Gewicht zwischen 50 bis 500 kg handelt, kann man salopp sagen: je kleiner das Gerät, umso grösser die vibrations-  
 5 onstechnische Herausforderung.

Entscheidend ist die Erkenntnis, dass alle vibrierenden Geräte für die maschinelle Bodenverdichtung, vom Stampfer bis zum Walzenzug, in ihrem nichtlinearen Verhalten mit Hilfe der Chaostheorie erklärt werden können. Sämtliche Bewegungsverhaltensformen können im Rahmen des Periodenverdoppelungsszenarios eindeutig verschiedenen Bifurkationszuständen zugeordnet werden [vom periodischen Abheben (keine Bifurkation)  
 10 bis zum voll ausgebildeten chaotischen Verhalten]. Die Chaostheorie ermöglicht erst den Gesamtüberblick über das Bewegungsverhalten der verschiedenen Geräteklassen.

Eine Bemerkung zur Schwingungsisolation des Chassis, bzw. Oberwagens: Diese Maschinenbaugruppe wird als fusspunkterregtes Teilsystem tief abgestimmt. Damit werden  
 15 Schwingungen im Bereich der Erregerfrequenz sehr gut isoliert. Mit zunehmender Zahl der auftretenden Bifurkationen geraten die subharmonischen Schwingungsanteile zunehmend in den Bereich der Resonanzfrequenz des Oberwagens/Chassis und die Schwingungsanteile werden dadurch mit steigender Zahl der aufgetretenen Bifurkationen transmittiert. In der Praxis ist dies an den grossen Bewegungen der entsprechenden  
 20 Maschinenteile zu erkennen. Auch aus diesem Grund sind subharmonische Schwingungen unerwünscht und möglichst zu vermeiden.

Die durch eine mit den oben erwähnten Bodenverdichtungsrichtungen erreichte und bestimmte Bodensteifigkeit  $k_B$  kann, sofern auf genaue (exakte) Bodensteifigkeitswerte verzichtet wird und man nur eine Anzeige wünscht, welche angibt, ob die Bodensteifigkeit bei weiteren Überfahrungen mit der Vorrichtung ansteigt oder einen bereits zufriedenstellenden Wert erreicht hat, stark vereinfacht und damit preisgünstig mit der nachfolgenden in **Figur 10** gezeigten Messvorrichtung **20** vorgenommen werden. Eine derartige Messvorrichtung **20** für einen Bodensteifigkeitsrichtwert wird man hauptsächlich bei den ohnehin preisgünstigen Vibrationsplatten einbauen.

Die Schwingungen des Unterwagens **17** werden mit einem Beschleunigungssensor **21** aufgenommen, mit einem Verstärker **23** verstärkt und mit einem Integrator **25** über einen vorgegebenen Zeitraum integriert. Die Integration wird vorgenommen um aus dem Beschleunigungswert, gemessen mit dem Beschleunigungssensor **21** nach zweimaliger

Integration einen Weg zu erhalten. Anschliessend wird das Ausgangssignal des Integrators 25 auf mehrere Bandpassfilter 27 geführt. Das Bandpassfilter ist derart ausgelegt, dass einmal die Anregungsfrequenz  $f$ , die erste Oberwelle mit der doppelten Anregungsfrequenz  $2 \cdot f$ , die erste Subharmonische mit der halben Anregungsfrequenz  $f/2$ , die zweite Subharmonische mit einer vierten Anregungsfrequenz  $f/4$  und die dritte Subharmonische mit einer achten Anregungsfrequenz  $f/8$  auf jeweils einen Ausgang 29a bis 29e transmittiert werden. Die Messvorrichtung hat hier beispielsweise für eine Überwachung der Frequenzen  $2 \cdot f$ ,  $f$ ,  $f/2$ ,  $f/4$  und  $f/8$  vier Quotientenbildner 31a bis 31d. Der Ausgang 29b (Ausgangssignal zu  $f$ ) ist als Divisor mit allen Quotientenbildnern 31a bis 31d verbunden. Alle Ausgänge sind mit je einem Quotientenbildner 31a bis 31d verbunden. Der Ausgang 29a (Ausgangssignal zu  $2 \cdot f$ ) ist als Dividend mit dem Quotientenbildner 31a verbunden, dessen Ausgangssignal (Quotient) an dessen Ausgang 33a anliegt. Der Ausgang 33a ist über eine Normierungsschaltung 35 an zwei Leuchten 37a in einem Anzeigetableau 39 geführt.

Analog wird mit den Ausgängen 29c ( $f/2$ ), 29d ( $f/4$ ) und 29e ( $f/8$ ) verfahren, welche als Dividend auf die Quotientenbildner 31b, 31c bzw. 31d geführt werden. Ein Ausgang 33b, 33c bzw. 33d des Quotientenbildners 31b, 31c bzw. 31d wird über die Normierungsschaltung 35 an jeweils zwei Leuchten 37b, 37c bzw. 37d im Anzeigetableau 39 geführt. Leuchten nur die Leuchten 37a ist der betreffende Bodenbereich noch nicht ausreichend verdichtet. Leuchten die Leuchten 37b ist eine bereits bessere Verdichtung erreicht, wobei die Verdichtung dann bis zu den Leuchten 37d immer besser wird. Leuchten beispielsweise die Leuchten 37b auch bei mehrmaligem Überfahren mit der Vibrationsplatte nicht auf, so ist eine weitere Verdichtung, sei es aufgrund der Bodenzusammensetzung oder der Maschinendaten der verwendeten Vibrationsplatte, nicht möglich. Analoges gilt für die Leuchten 37c bzw. 37d.

Anstelle der beiden Leuchten könnte sofern nur das Auftreten der Subharmonischen angezeigt werden soll nur eine einzige Leuchte verwendet werden. Es wird jedoch mit der Messvorrichtung 20 nicht nur das Frequenzverhalten ermittelt, es werden auch die maximalen Schwingungsamplituden der einzelnen Schwingungen (Einwirkungsfrequenz  $f$ , Oberwellen  $n \cdot f$ , Subharmonische  $f/[2 \cdot n]$ ) ausgewertet. In Figur 6 sind in der mittleren unteren Darstellung ("Feigenbaum Szenario") beim Auftreten der ersten Subharmonischen  $f/2$  für einen bestimmten Zustand die Amplituden  $A(f)$  und  $A(f/2)$  der Einwirkungsfrequenz  $f$  und der ersten Subharmonischen  $f/2$  eingezeichnet. Das untere rechte Bild in derselben Figur 6 zeigt die beiden Amplitudenwerte. Es ist hier ersichtlich,

dass die maximale Amplitude  $A(f)$  mit der Einwirkungsfrequenz  $f$  kleiner ist als diejenige  $A(f/2)$  der ersten Subharmonischen  $f/2$ . Die zu erwartenden maximalen Amplituden können analog aus dem "Feigenbaum Szenario" abgelesen werden. Auf der Abszisse des "Feigenbaum Szenarios" ist die Bodensteifigkeit  $k_B$  (Verdichtungsgrad) aufgetragen.

5 Sind somit die tiefste vorhandene Subharmonische sowie die maximalen Amplituden der Schwingungsfrequenzen bekannt, kann auf die Bodensteifigkeit  $k_B$  (Verdichtungsgrad) geschlossen werden. Ist ein durch die Normierungsschaltung 35 vorgegebener Amplitudenwert erreicht, leuchtet die jeweils zweite Leuchte der Leuchtenanordnung. Selbstverständlich kann auch die Leuchtstärke in Abhängigkeit der Amplitudenhöhe gesteuert werden.

Anstelle des Bandpassfilters 27 kann auch eine Einheit verwendet werden, welche eine schnelle Fourier-Transformation (Fast Fourier Transformation FFT) ausführt.

15 Anstelle eines Bandpassfilters 27 kann auch innerhalb von Zeitfenstern die jeweilige Schwingungsamplitude bestimmt werden. Hierbei wird man, ausgehend immer von der untersten Lage des Exzentrers und bekannter Umdrehungsgeschwindigkeit, die Amplitudenwerte für die erste Oberwelle und entsprechenden Subharmonischen aufnehmen, sofern sie vorhanden sind.

20 In Figur 11 ist eine Variante zu der in Figur 10 dargestellten Schaltung dargestellt. Im Gegensatz zur Schaltung 20 in Figur 10 wird in dieser Schaltung 40 ein zum Beschleunigungssensor 21 analog ausgebildeter Beschleunigungssensor 42 am Oberwagen 15 einer Vibrationsplatte 14 angeordnet. Durch (nicht dargestellte) Dämpfungselemente zwischen Ober- und Unterwagen erfolgt eine Schwingungsdämpfung. Die Ausgangssignale des Beschleunigungssensors 42 für die erste Oberwelle  $2f$  und die erste und zweite Subharmonische  $f/2$  und  $f/4$  werden nun im Gegensatz zur Schaltung 20 nicht  
25 integriert und als Beschleunigungssignale nach einer Verstärkung durch den Verstärker 23 in einem Bandpassfilter 41 bearbeitet. Die Signale sind nämlich in der Regel ausreichend hoch. Das Signal der dritten Subharmonischen  $f/8$  wird nun, da es in der Regel klein ist, mit einem Integrator 43 integriert und analog wie in Figur 10 verarbeitet. Es muss nicht erst ab der dritten Subharmonischen  $f/8$  integriert werden. Es kann auch bereits die zweite Subharmonische  $f/4$  oder erst die vierte Subharmonische  $f/16$  integriert  
30 werden.

Der Sensor zur Aufnahme der Schwingungsform des Schwingungssystems ist gemäss obiger Beschreibung am Unterwagen 11 bzw. 17 oder am Chassis 6 angeordnet; er

kann aber auch am Oberwagen 9 bzw. 15 angeordnet werden. Bei einer Anordnung am Oberwagen 9 bzw. 15 sind Schwingungsbeeinflussungen durch die Dämpfungselemente, wie oben skizziert, zu beachten.

Der Nachweis des chaotischen Verhaltens dynamisch erregter Verdichtungsgeräte stellt die aus verschiedenen Untersuchungen bekannten Schwingungsverhaltensweisen in einen gemeinsamen Kontext. Basis ist die einseitige Bindung zwischen Boden (Asphaltschicht) und dem schwingenden Teil des Gerätes. Die Vergrößerung der Schwingungserregung und/oder die zunehmende Steifigkeit des Bodens mit zunehmender Verdichtung führt zum periodischen Abheben des Verdichtungsgerätes vom Boden. Die resultierende Nichtlinearität nimmt mit grösserer Unwucht, bzw. weiter zunehmender Verdichtung zu, was zur Bifurkation des Bewegungsverhaltens führt. Die Verzweigung tritt plötzlich auf und stellt je nach Maschinentyp einen unerwünschten oder gewollten Betriebszustand dar. Deshalb wird dieser bei geregelten Walzen durch Verringern der vertikal wirksamen Unwucht vermieden. Bei ungeregelten Verdichtungsgeräten tritt der schwingende Teil in das Periodenverdoppelungsszenario ein, das Bewegungsverhalten wird chaotisch. Die nichtlinearen Schwingungen aller Verdichtungsgeräte führen mit zunehmender Nichtlinearität über das Periodenverdoppelungsszenario ins deterministische Chaos. Die subharmonischen Schwingungen übertragen sich zudem auf den Oberwagen, bzw. das Chassis. Das chaotische Verhalten der Bandage macht das Lenken der Maschine unmöglich, Kornzertrümmerungen und Auflockerungen an der Oberfläche sind weitere, unerwünschte Folgen. Dieser Betriebszustand beansprucht die Maschine zudem sehr stark und ist somit in der Praxis zu unterbinden.

Der Nachweis des chaotischen Betriebsverhaltens zeigt die Obergrenzen der Verdichtungsleistung heutiger Geräte auf. Die maximal mögliche, in den Boden einzutragende Leistung wird durch das beginnende Periodenverdoppelungsszenario begrenzt. Will man Verdichtungsgeräte mit besserer Leistung bauen, muss die Energie auf alternative Art und Weise in den Untergrund eingebracht werden. Ausgelöst wird das deterministische Chaos durch die kraftgesteuerte Nichtlinearität der einseitigen Bindung zwischen Bandage/Unterwagen und Boden. Die optimale Anpassung von Amplitude und Frequenz in Funktion des Bodenzustands bei der neusten Generation selbstregelnder Vibrationswalzen und Walzenzüge ist eine sehr effektive Möglichkeit, den Leistungseintrag in den Boden zu maximieren.

Die Bandbreite praktisch auftretender Schwingungsformen kann mit der chaostheoretischen Betrachtung des Verdichtungsgerätes einfach abgeschätzt und die einzelnen

Maschinenteile für die zu erwartenden Extrembelastungen dimensioniert werden. Viele praktische Beanspruchungsbilder lassen sich erst mit Hilfe der subharmonischen Schwingungen erklären.

- 5 Klassische und moderne Methoden der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) fassen sowohl bezüglich ihrer Grundlagen als auch ihrer praktischen Anwendungen (Normen) auf der Chaostheorie.

Die Erkenntnisse aus der Anwendung der Theorie des deterministischen Chaos bilden eine hervorragende Basis für die künftige Verdichtungsgeräteentwicklung.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung einer Bodensteifigkeit ( $k_B$ ) (Verdichtungsgrad) eines verdichteten bzw. zu verdichtenden Bodenbereichs (7), in dem eine auf den Bodenbereich (7) einwirkende Bodenkontakteinheit (5; 11; 17) einer Bodenverdichtungs-  
 5 vorrichtung (1; 12; 14) über diesen bewegt wird, wobei auf die Bodenkontakteinheit (5; 11; 17) eine zeitlich sich periodisch mit wenigstens einer Einwirkungsfrequenz ( $f$ ) ändernde Bodenverdichtungskraft ( $F_B$ ) einwirkt und Schwingungen eines Schwingungssystems [Bodenverdichtungs-  
 10 vorrichtung (1; 12; 14) mit Bodenkontakteinheit (5; 11; 17) - Bodenbereich (7)] ermittelt werden, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Schwingungsform der Schwingung des Schwingungssystems ( $f$ ,  $f/[2 \cdot n]$ ,  $A(f)$ ,  $A(f/[2 \cdot n])$ ) aufgenommen wird und aus der Schwingungsform, aus Maschinenpa-  
 15 rametern der Bodenverdichtungs-  
 vorrichtung und aus einer zeitlichen Lage der ein-  
 wirkenden Bodenverdichtungskraft ( $F_B$ ) die Bodensteifigkeit ( $k_B$ ) (Verdichtungsgrad) er-  
 mittelt wird.
  
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Einwirkungs-  
 20 frequenz ( $f$ ) Subharmonische ( $f/2$ ,  $f/4$ ,  $f/8$  usw.) aus der Schwingungsform ( $f$ ,  $f/[2 \cdot n]$ ,  $A(f)$ ,  $A(f/[2 \cdot n])$ ) des Schwingungssystems ermittelt werden und aus sämtlichen Subharmonischen ( $f/2$ ,  $f/4$ ,  $f/8$  usw.) zur Einwirkungs-  
 frequenz ( $f$ ) diejenige mit der tiefsten Frequenz ( $f/[2 \cdot n]$ ) ermittelt wird, wobei eine erreichte Bodensteifigkeit ( $k_B$ ) umso höher ist, je tiefer die Frequenz der tiefsten subharmonischen Frequenz ( $f/[2 \cdot n]$ ) ist, und vorzugsweise Schwingungsamplitudenwerte ( $A(f)$ ,  $A(f/[2 \cdot n])$ ) der Subharmonischen ( $f/[2 \cdot n]$ ) aus der Schwingungsform sowie der Einwirkungs-  
 25 frequenz ( $f$ ) miteinander in eine gegenseitige Beziehung zur exakteren Ermittlung der Bodensteifigkeit ( $k_B$ ) (Verdichtungsgrad) gebracht werden.
  
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zeitlich sich periodisch ändernde Bodenverdichtungskraft ( $F_B$ ) eine reine "Sinus"-



Schwingung einer einzigen Frequenz ( $f$ ) oder vorzugsweise eine Überlagerung mehrerer "Sinus"-Schwingungen ist.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die  
 5      Einwirkungsfrequenz ( $f$ ) der sich zeitlich ändernden Bodenverdichtungskraft ( $F_B$ )  
       auf eine Resonanzfrequenz ( $f_0$ ) des Schwingungssystems eingestellt wird oder  
       vorzugsweise auf eine Frequenz eingestellt wird, welche die Resonanzfrequenz ( $f_0$ )  
       um einen vorgegebenen, lediglich von Einstellstabilitäten bestimmten, Fre-  
       quenzwert überschreitet.
- 10      5. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die jeweils tiefste  
       Subharmonische ( $f/[2 \cdot n]$ ) bei einer Bewegung der Bodenkontakteinheit (5; 11; 17)  
       über einen jeweiligen Bodenbereich (7) diesem Bodenbereich (7) zugeordnet ab-  
       gespeichert wird und mit einer tiefsten gemessenen Subharmonischen ( $f/[2 \cdot n]$ )  
 15      bei einem erneuten Überfahren verglichen wird und ein weiteres Überfahren einge-  
       stellt wird, sofern keine tiefere Subharmonische ( $f/[2 \cdot n]$ ) nach einer vorgegebenen  
       Anzahl Überfahrten erreicht wird, da keine weitere Bodenverdichtung bei den  
       eingestellten Maschinendaten erreichbar ist.
- 20      6. Verfahren nach Anspruch 2 oder 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass Amplituden-  
       werte der Schwingungen der Subharmonischen über einen jeweiligen Bodenbe-  
       reich (7) diesem Bodenbereich (7) zugeordnet abgespeichert werden und mit den  
       Amplitudenwerten bei einem erneuten Überfahren verglichen werden und ein wei-  
       teres Überfahren eingestellt wird, sofern ein erhöhter Amplitudenwert der tiefsten  
 25      Subharmonischen nach einer vorgegebenen Anzahl Überfahrten erreicht wird,  
       da keine weitere Bodenverdichtung bei den eingestellten Maschinendaten erreich-  
       bar ist.

7. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Amplitude ( $A_0$ ) der anregenden Bodenverdichtungskraft ( $F_B$ ) unmittelbar nach der Ermittlung der jeweils tiefsten Subharmonischen ( $f/[2 \cdot n]$ ) auf einen Wert zurückgestellt wird, bis eine stabile Lage der Bodenverdichtungsanordnung erreicht ist.

5

8. Bodenverdichtungsanordnung (1; 12; 14) zur Verdichtung eines Bodenbereichs (7) auf eine vorgegebene Bodensteifigkeit ( $k_B$ ) (Verdichtungsgrad) mit einer auf den Bodenbereich (7) einwirkenden Bodenkontakteinheit (5; 11; 17), mit einem Antrieb für wenigstens eine schwingende Masse ( $m_d$ ), welche auf die Bodenkontakteinheit (5; 11; 17) eine periodisch sich ändernde Bodenverdichtungskraft ( $F_B$ ) ausübt, und mit wenigstens einem Sensor (21) zur Ermittlung einer Schwingung eines Schwingungssystems [Bodenverdichtungsanordnung (1; 12; 14) mit Bodenkontakteinheit (5; 11; 17) - Bodenbereich (7)], **gekennzeichnet durch** eine mit dem wenigstens einen Sensor (21) verbundene Auswerteeinheit (20), mit der ausgehend von einer auf die Bodenkontakteinheit (5; 11; 17) wirkenden, anregenden Schwingung bzw. anregenden Schwingungen mit einer Einwirkungsfrequenz ( $f$ ) bzw. -frequenzen eine Schwingungsform aufnehmbar und abspeicherbar ist und aus der Schwingungsform, aus Maschinenparametern der Bodenverdichtungsanordnung (1; 12; 14) und aus einer zeitlichen Lage der Bodenverdichtungskraft ( $F_B$ ) die Bodensteifigkeit ( $k_B$ ) (Verdichtungsgrad) mit der Auswerteeinheit (20) ermittelbar ist.
9. Bodenverdichtungsanordnung (1; 12; 14) nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Einwirkungsfrequenz ( $f$ ) der wenigstens einen schwingenden Masse ( $m_d$ ) mit der Auswerteeinheit (20) hierzu mehrere Subharmonische ( $f/2$ ,  $f/4$ ,  $f/8$  usw.) ermittelbar sind und aus diesen Subharmonischen ( $f/2$ ,  $f/4$ ,  $f/8$  usw.) diejenige mit einer tiefsten Frequenz ( $f/[2 \cdot n]$ ) als Mass für die Bodensteifigkeit ( $k_B$ ) (Verdichtungsgrad) bestimmbar ist, wobei die erreichte Bodensteifigkeit ( $k_B$ ) umso höher ist, je tiefer die Frequenz der tiefsten subharmonischen Frequenz ( $f/[2 \cdot n]$ ) ist, und vorzugsweise mit der Auswerteeinheit (20), vorzugsweise maximale, Amplitudenwerte ( $A(f)$ ,  $A(f/[2 \cdot n])$ ) der Subharmonischen ( $f/[2 \cdot n]$ ) aus der Schwingungsform sowie der Einwirkungsfrequenz ( $f$ ) miteinander in eine gegenseitige Be-

ziehung zur exakteren Ermittlung der Bodensteifigkeit ( $k_B$ ) (Verdichtungsgrad) gebracht werden.

- 5      10. Bodenverdichtungsvorrichtung (1; 12; 14) nach Anspruch 8 oder 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass der wenigstens eine Sensor mit dem Antrieb verbunden ist und die Frequenz der wenigstens einen schwingenden Masse durch den Antrieb derart einstellbar ist, dass eine maximale Schwingungsamplitude erreichbar ist, was eine Resonanz eines Schwingungssystems anzeigt.
- 10      11. Bodenverdichtungsvorrichtung (1; 12; 14) nach einem der Ansprüche 7 bis 9, **gekennzeichnet durch** einen zweiten Sensor, mit dem der Zeitpunkt einer, vorzugsweise maximalen, Kraft der wenigstens einen schwingenden Masse in Bodenverdichtungsrichtung feststellbar ist, wobei der erste Sensor derart ausgebildet ist, dass er zusätzlich eine vorgegebenen, vorzugsweise eine maximale, Schwingungsamplitude der Bodenkontakteinheit in Bodenverdichtungsrichtung feststellen kann, und eine mit den beiden Sensoren und dem Antrieb verbundene Vergleichereinheit, welche die Antriebsfrequenz derart einstellt, dass zwischen den beiden maximalen Amplitudenwerten ein voreilender Phasenwinkel der anregenden Masseschwingung zwischen  $90^\circ$  und  $180^\circ$ , vorzugsweise zwischen  $95^\circ$  und  $130^\circ$ , vorhanden ist.

15

20
- 25      12. Bodenverdichtungsvorrichtung (1; 12; 14) nach einem der Ansprüche 8 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass die wenigstens eine schwingende Masse eine veränderbare Unwucht hat und die Unwucht derart in ihrem Unwuchtmoment reduzierbar ist, dass die gemessenen Subharmonischen gerade noch in die Messempfindlichkeit des ersten Sensors fallen.

### Zusammenfassung

- Zur Ermittlung einer Bodensteifigkeit ( $k_B$ ) (Verdichtungsgrad) eines verdichteten bzw. zu verdichtenden Bodenbereichs (7) wird eine auf den Bodenbereich (7) einwirkende Bodenkontakteinheit (5) einer Bodenverdichtungsanordnung über diesen bewegt. Auf die
- 5 Bodenkontakteinheit (5) wirkt eine zeitlich sich periodisch mit wenigstens einer Einwirkungsfrequenz ( $f$ ) ändernde Kraft ein. Die Schwingungen ( $f$ ) eines Schwingungssystems 'Bodenverdichtungsanordnung mit Bodenkontakteinheit - Bodenbereich' werden ermittelt. Die Schwingungsform der Schwingung des Schwingungssystems wird aufgenommen und aus der Schwingungsform, aus den Maschinenparameteren der Bodenverdichtungsanordnung und aus der zeitlichen Lage der einwirkenden Bodenverdichtungskraft die
- 10 Bodensteifigkeit ( $k_B$ ) (Verdichtungsgrad) ermittelt. Vorzugsweise werden zur Einwirkungsfrequenz ( $f$ ) Subharmonische ( $f/2$ ,  $f/4$ ,  $f/8$  usw.) ermittelt. Aus sämtlichen Subharmonischen ( $f/2$ ,  $f/4$ ,  $f/8$  usw.) der Einwirkungsfrequenz ( $f$ ) in den Schwingungen ( $f$ ) der Bodenkontakteinheit (5) wird diejenige mit der tiefsten Frequenz ( $f/[2 \cdot n]$ ) ermittelt.
- 15 Die erreichte Bodensteifigkeit ( $k_B$ ) ist umso höher, je tiefer die Frequenz der tiefsten subharmonischen Frequenz ( $f/[2 \cdot n]$ ) ist. Neben einer Ermittlung der jeweils tiefsten Subharmonischen können auch Amplituden  $A(f)$  der Einwirkungsfrequenz ( $f$ ) und die Amplituden  $A(f/[2 \cdot n])$  der Subharmonischen ( $f/[2 \cdot n]$ ) ausgewertet werden.

20

(Fig. 6)

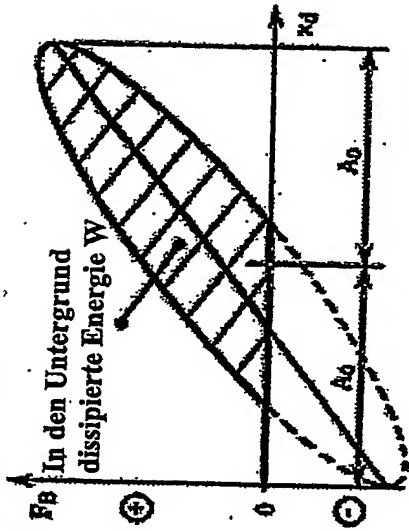
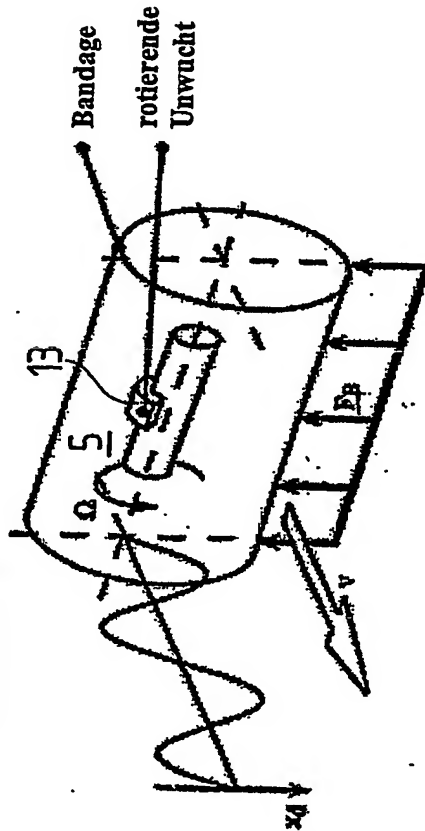
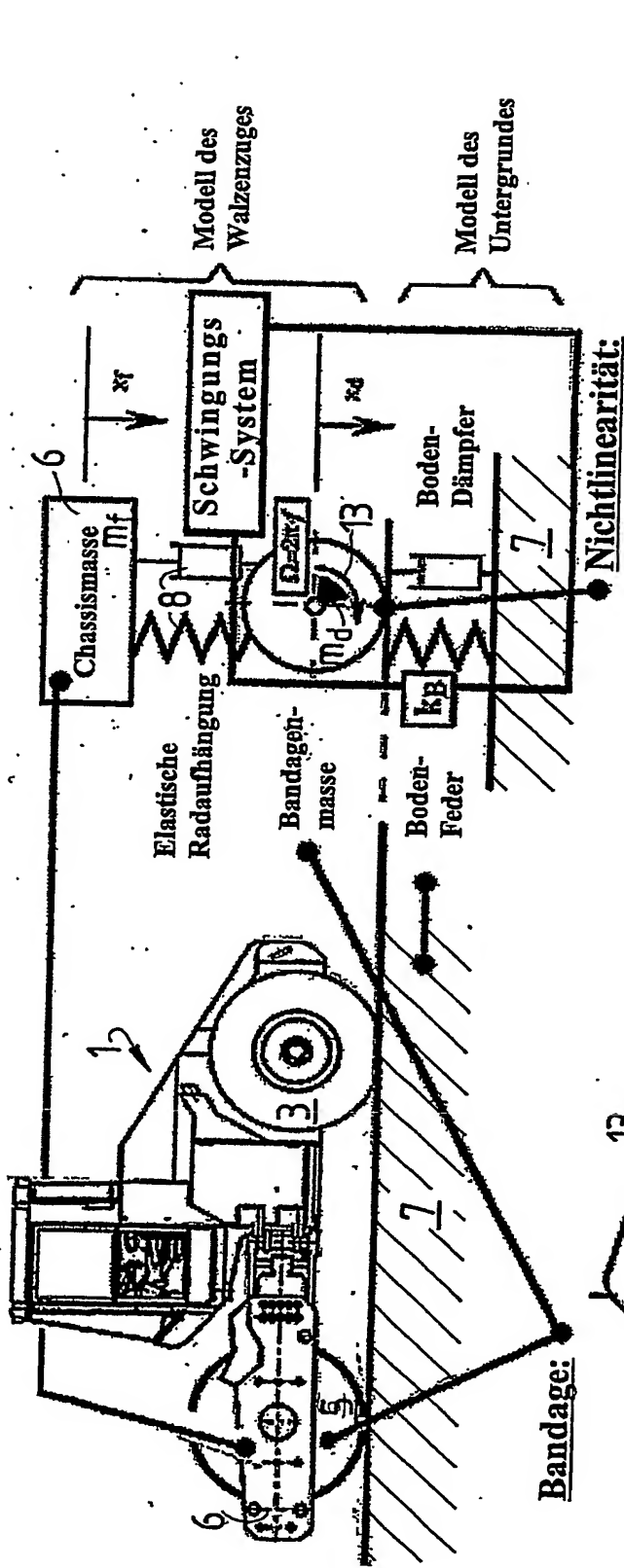


Fig. 1

Boden überträgt nur Druckkräfte

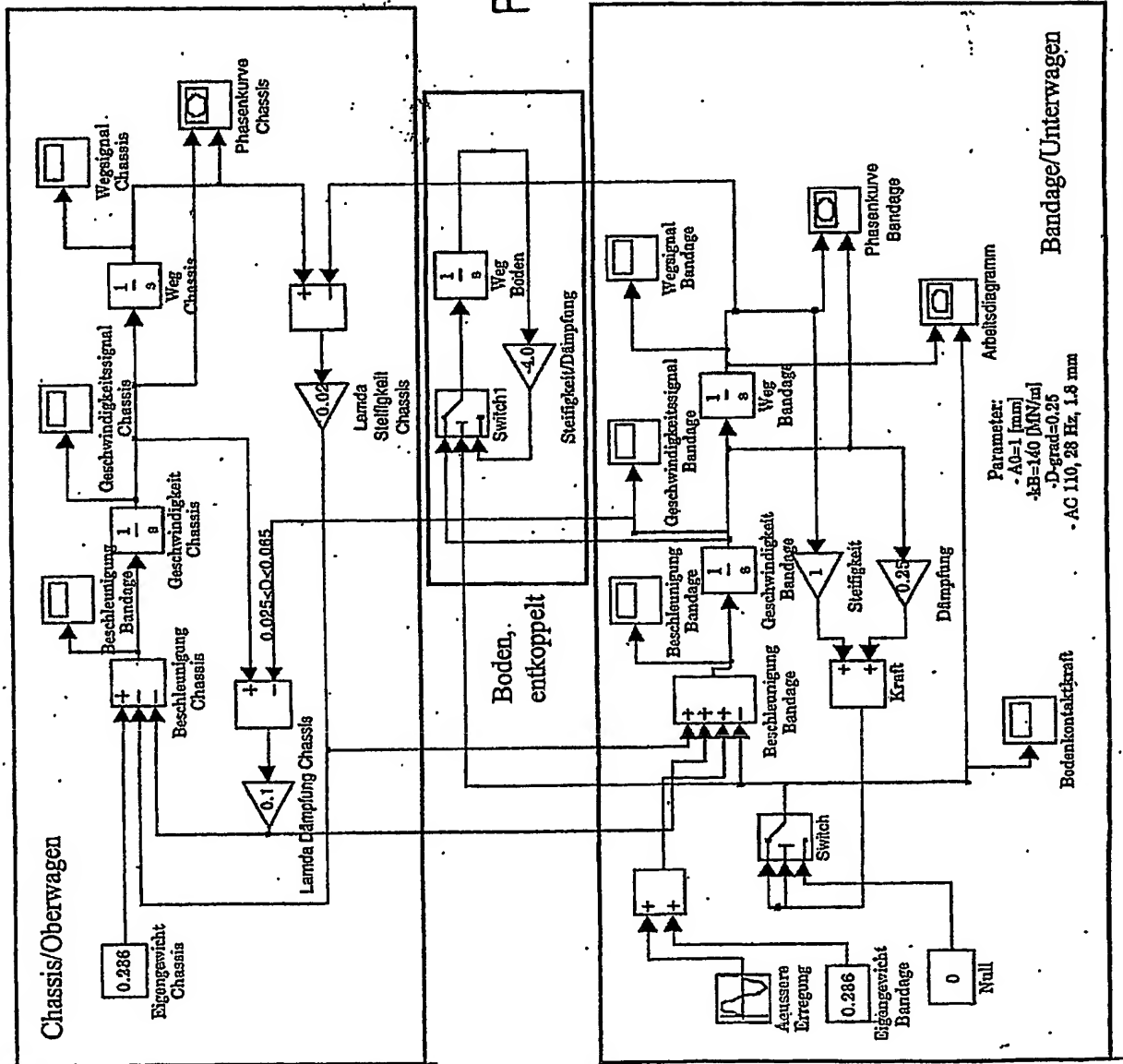


Fig. 2

AC 110: 11 t. Gesamtgewicht; 36 [Hz]; 1.0 [mm] th. Amplitude

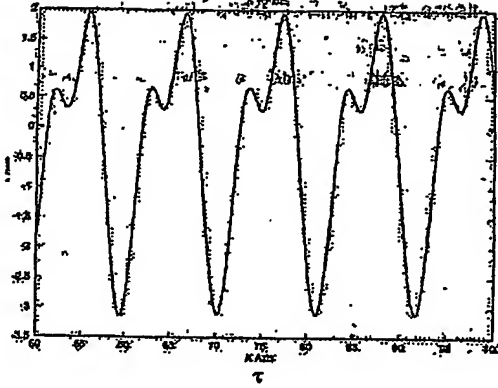
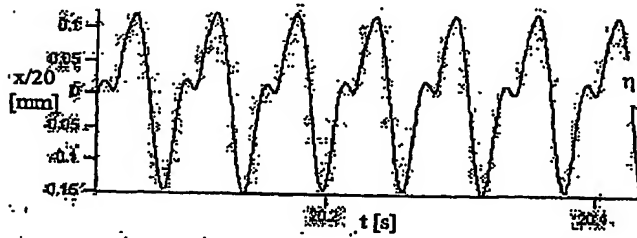


Fig. 3

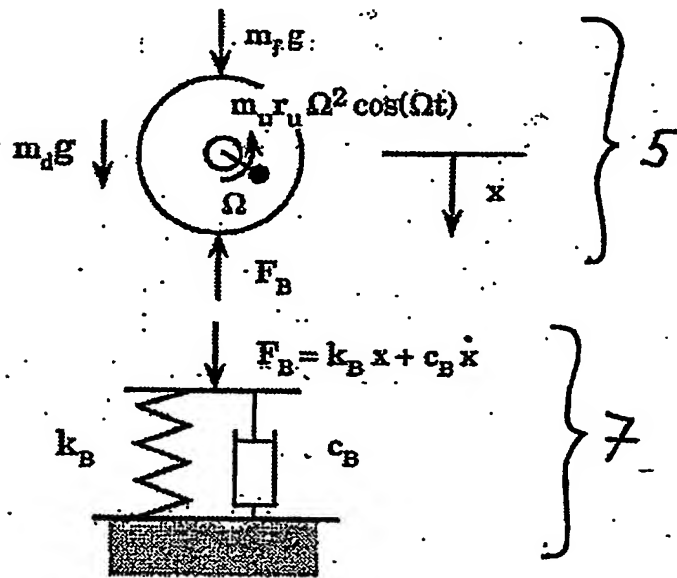


Fig. 4

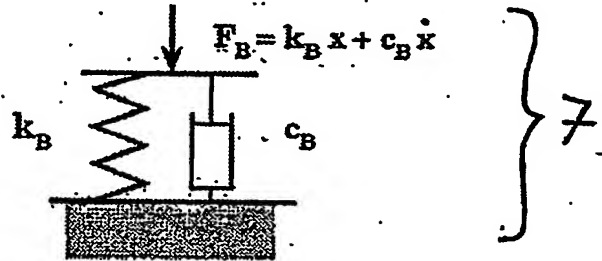
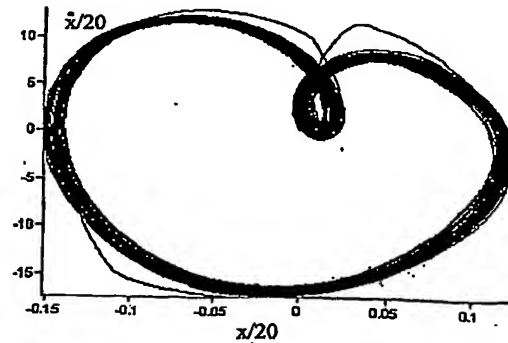
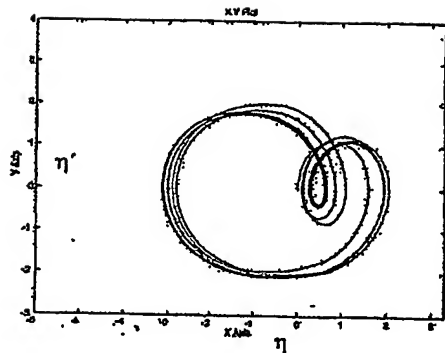


Fig. 5



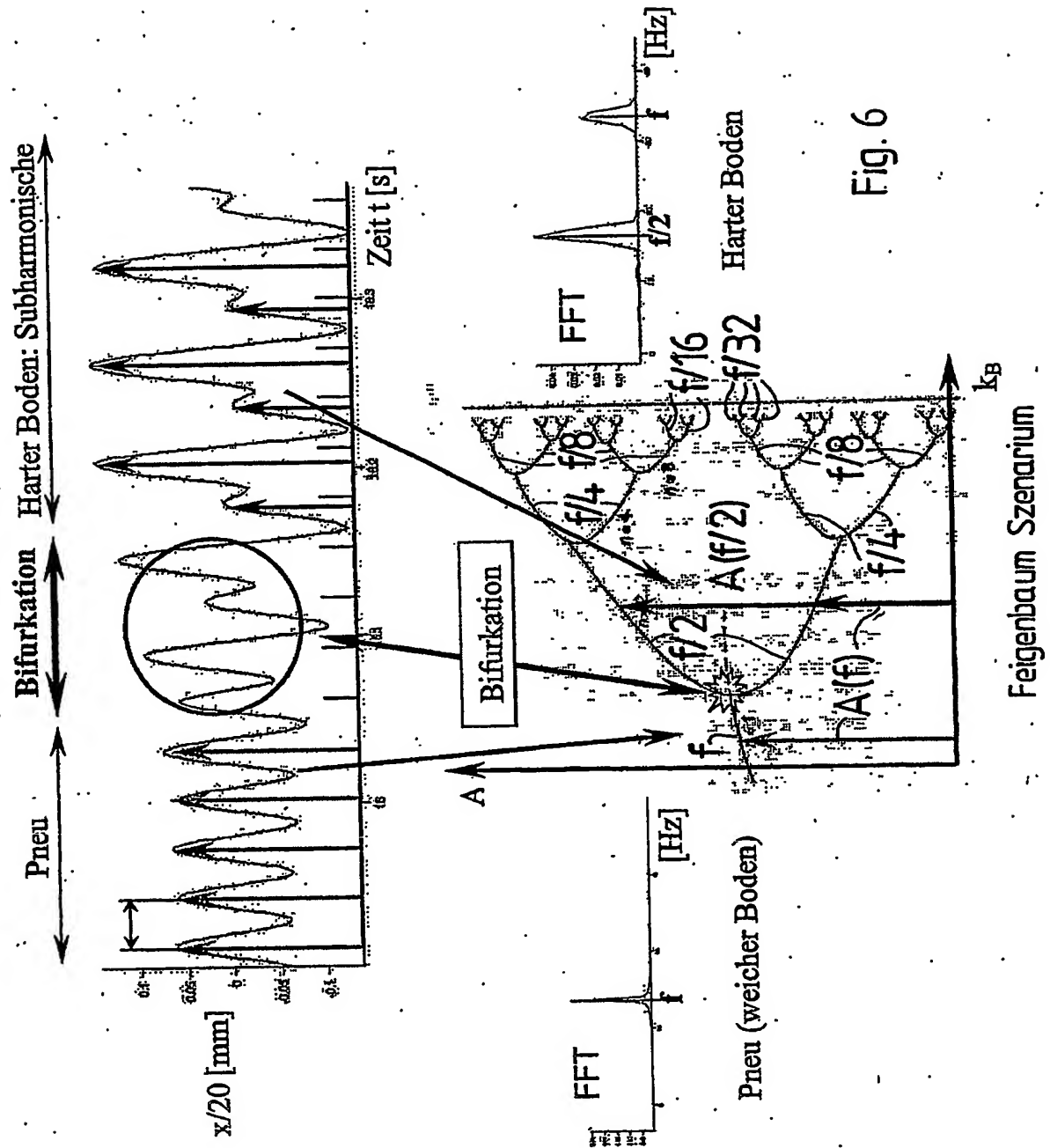


Fig. 6

Feigenbaum Szenarium



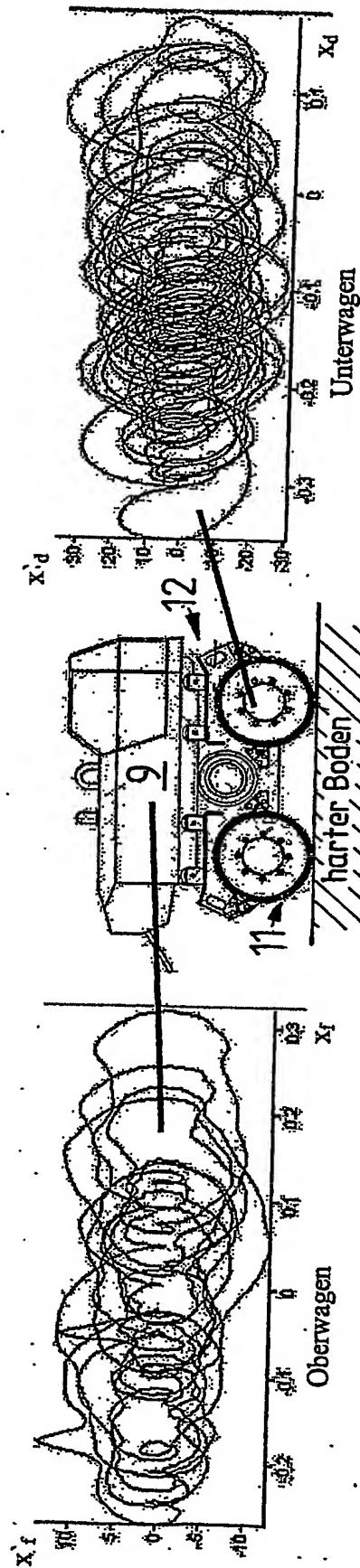
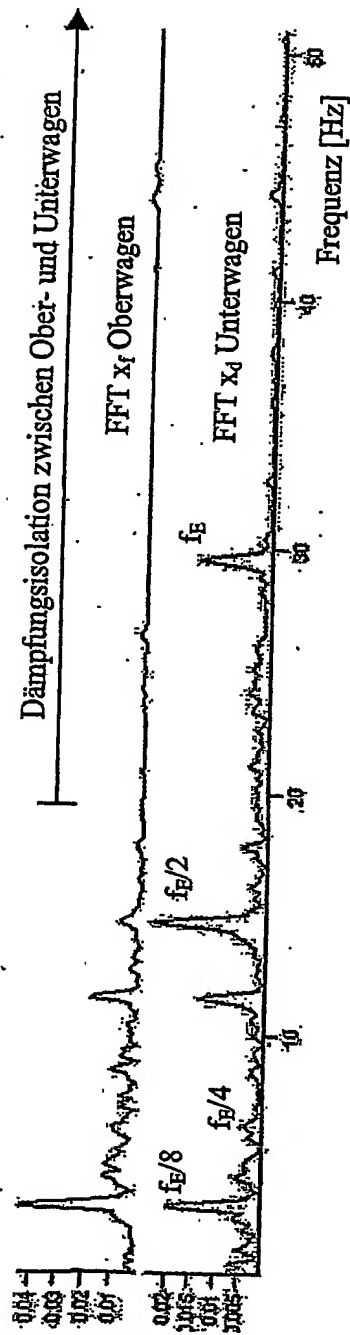
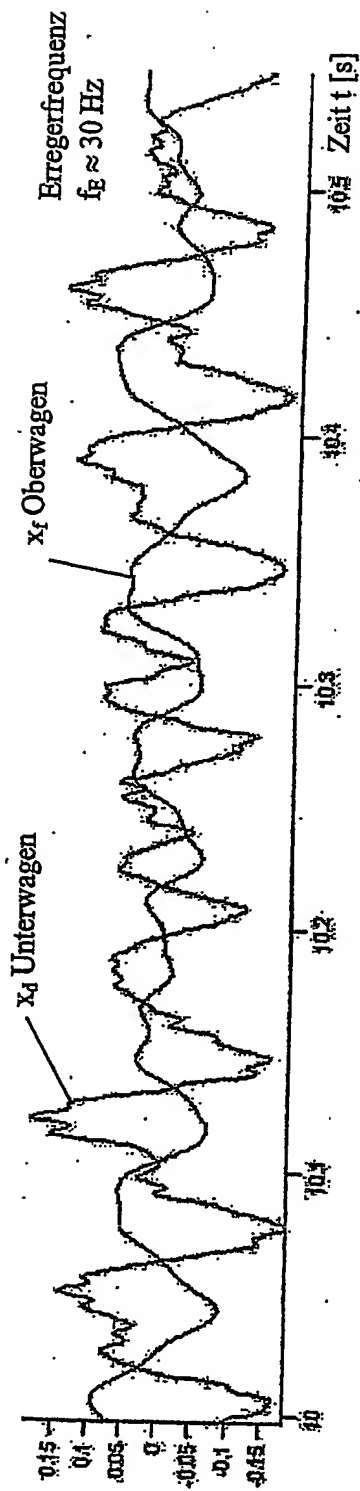


Fig.7

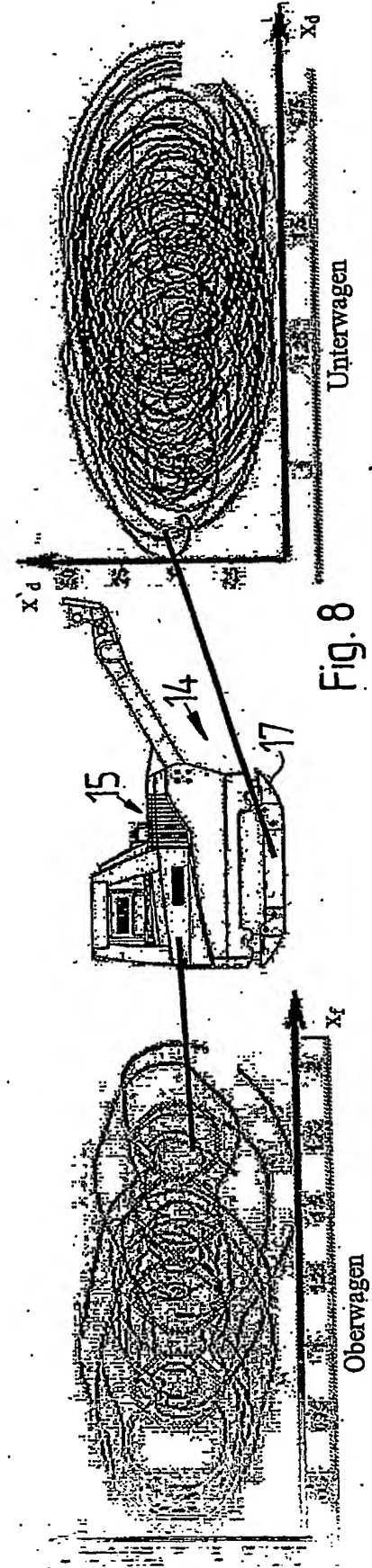
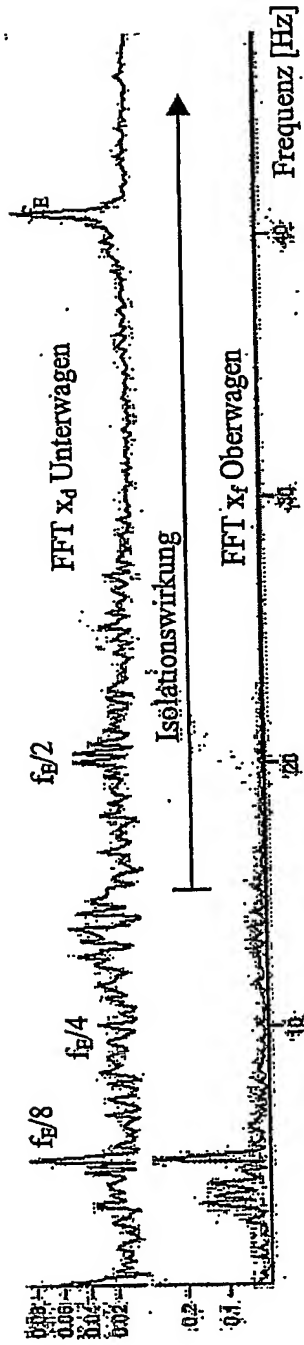
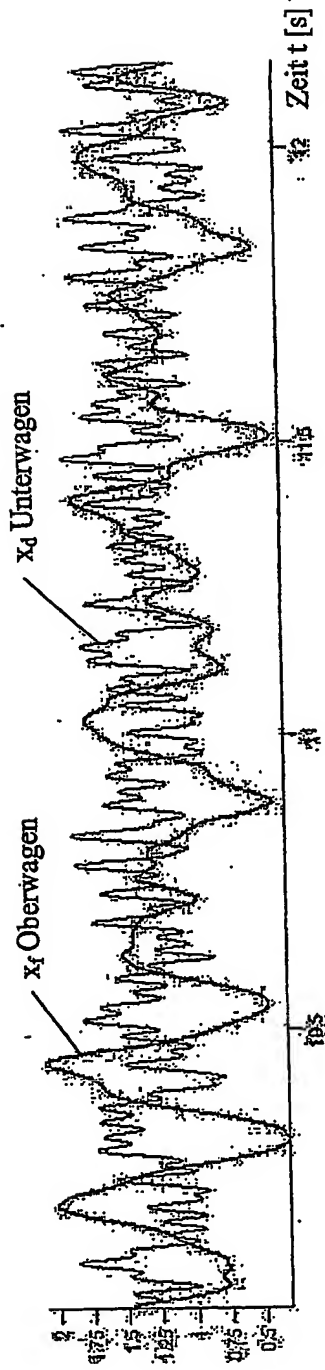
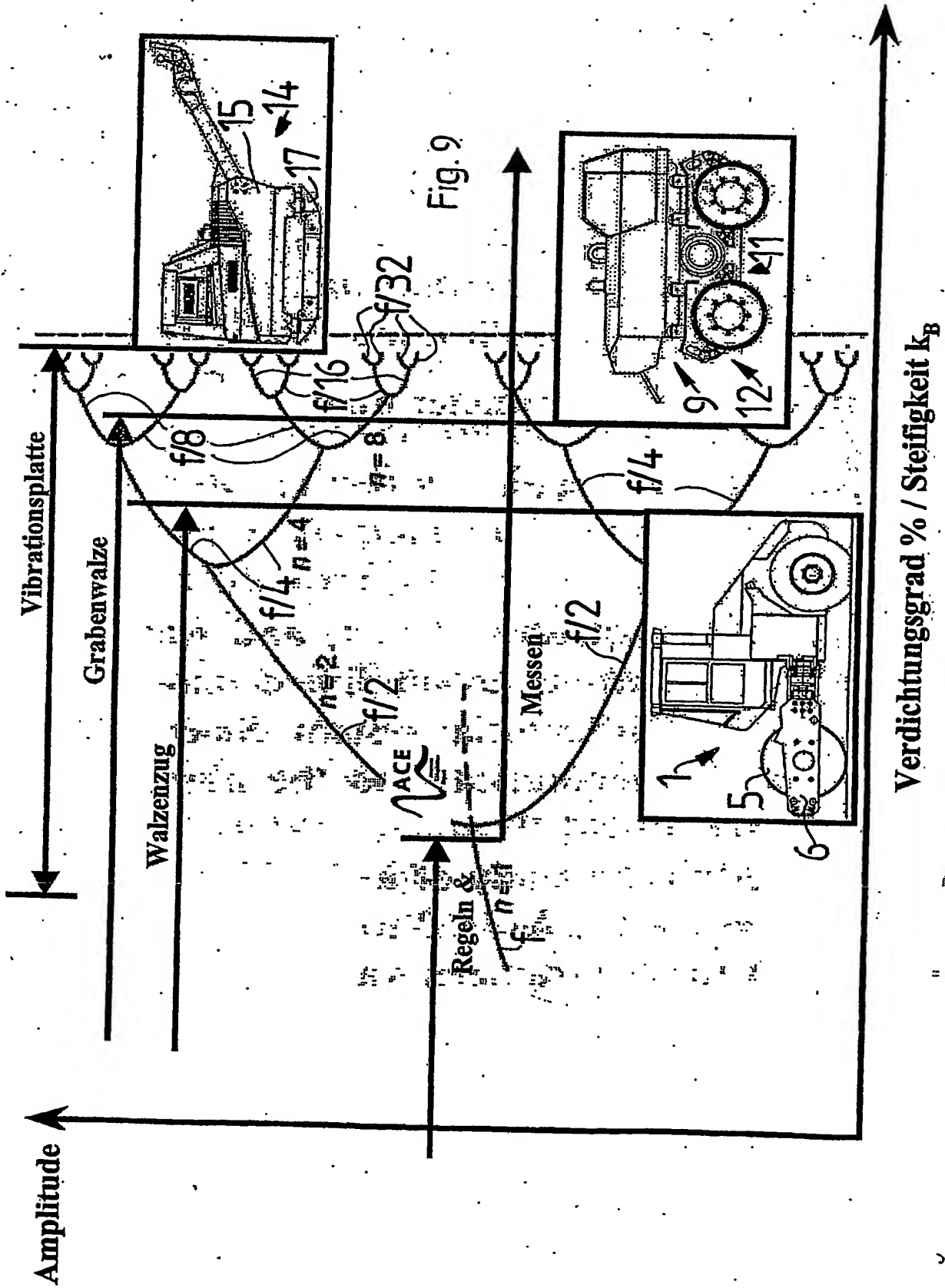


Fig. 8



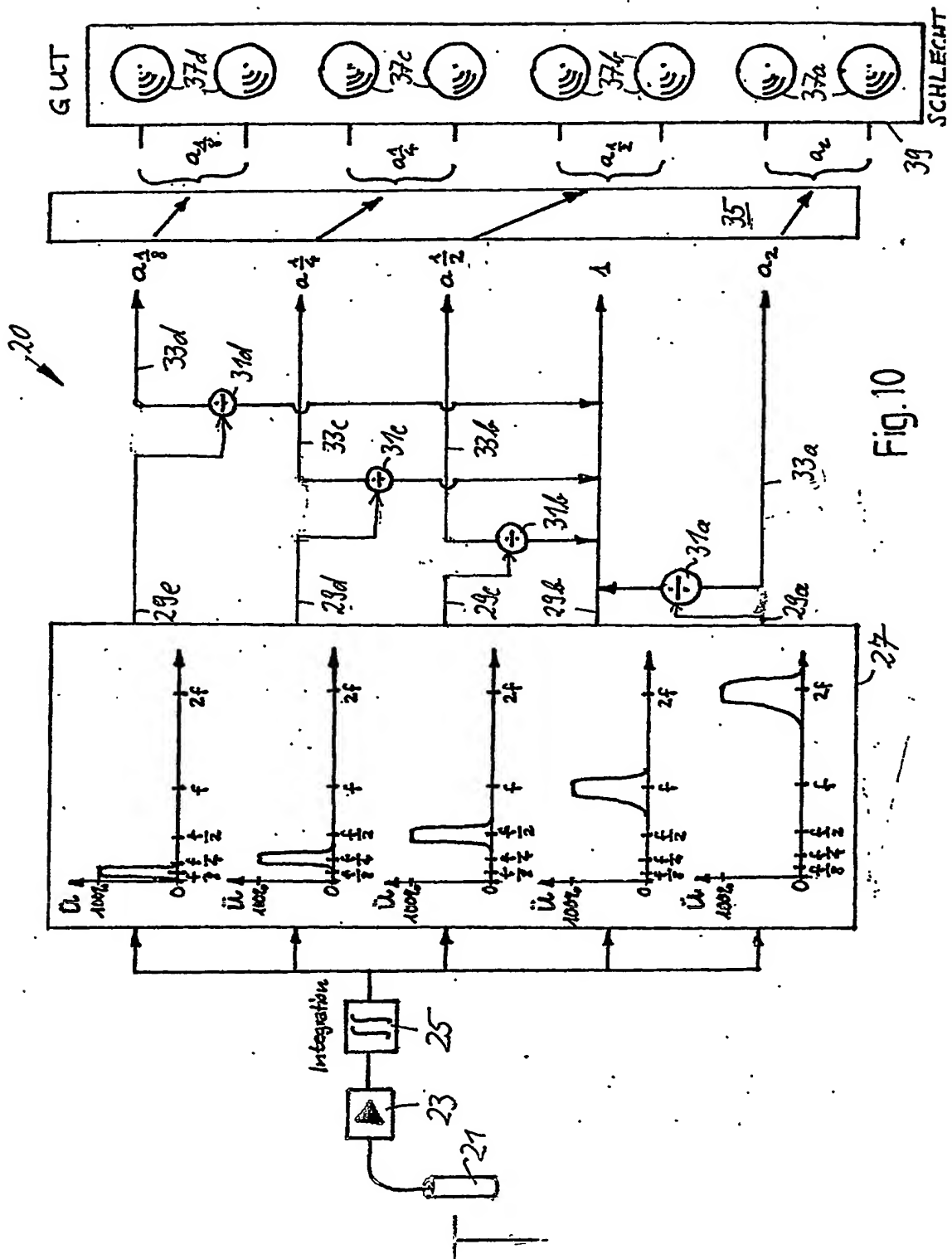


Fig. 10

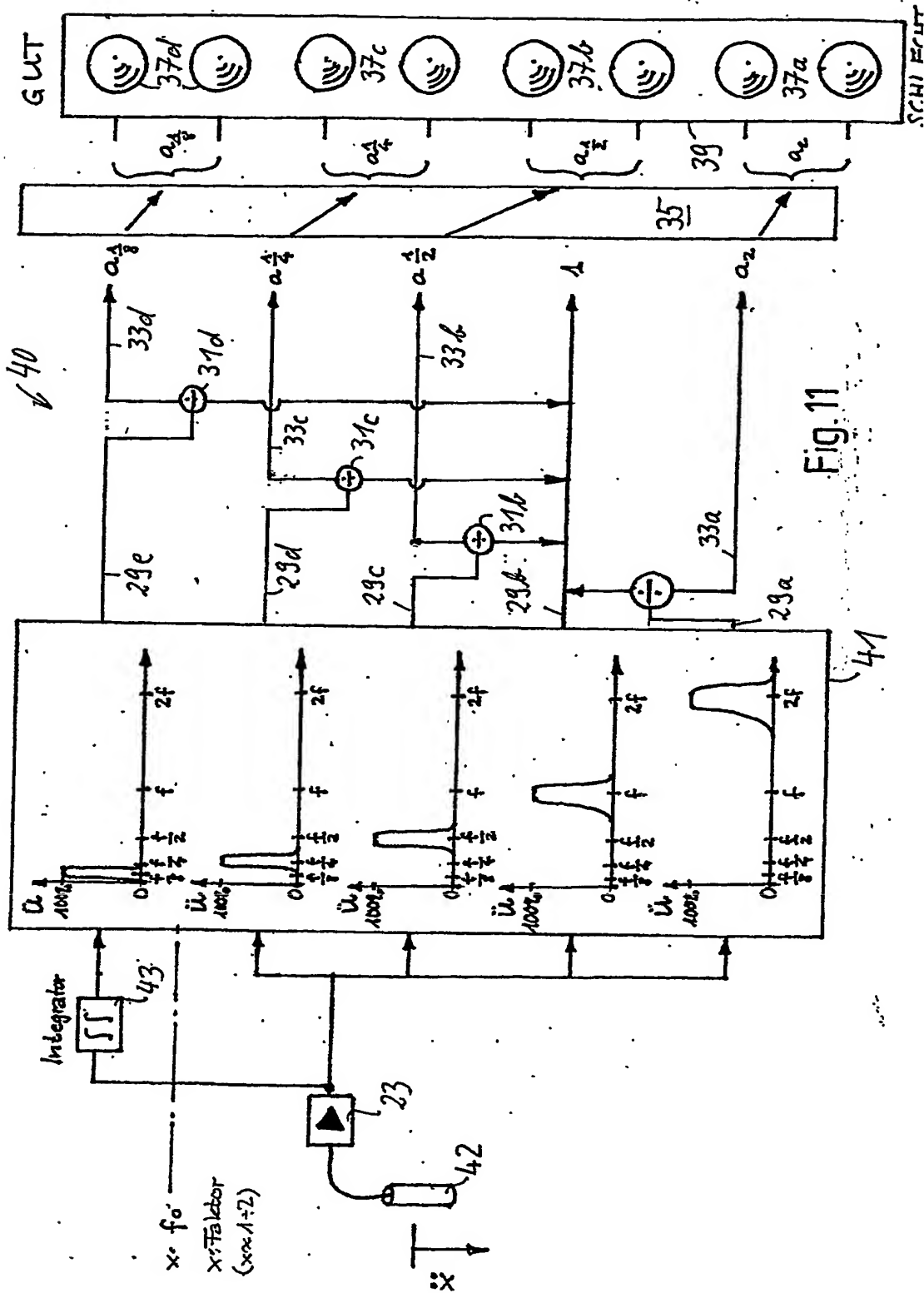


Fig. 11

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☒ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☒ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☒ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**